



Instituto Superior de Economia e Gestão

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

DESDE 1911

MESTRADO

DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO

TRABALHO DE PROJETO

TARIFAS DE ELETRICIDADE EM CONTEXTO DE SMART
METERING
DETERMINAÇÃO DE PERÍODOS TARIFÁRIOS

PAULO NUNO VISEU DE OLIVEIRA

JANEIRO - 2013



Instituto Superior de Economia e Gestão

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

DESDE 1911

MESTRADO

DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO

TRABALHO DE PROJETO

TARIFAS DE ELETRICIDADE EM CONTEXTO DE SMART
METERING
DETERMINAÇÃO DE PERÍODOS TARIFÁRIOS

PAULO NUNO VISEU DE OLIVEIRA

ORIENTAÇÃO:

PROFESSORA MARGARIDA VAZ PATO

JANEIRO - 2013

Índice

Índice	i
Lista de figuras.....	ii
Lista de tabelas.....	iii
Tabela de siglas.....	iii
Glossário.....	v
Agradecimentos	vi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento atual do setor elétrico na Europa	1
1.2 Tarifas de eletricidade.....	2
1.3 Medição de energia elétrica e períodos tarifários.....	3
1.4 Tarifas aderentes aos custos marginais e participação da procura	4
2 Definição do problema e revisão de literatura	7
2.1 Definição do objeto de estudo.....	7
2.2 Modelo utilizado pela ERSE na definição dos períodos tarifários	7
2.3 Modelos utilizados por outras instituições na definição dos períodos tarifários em tarifas TOU.....	8
2.4 Modelação da dinâmica da procura	9
2.4.1 Conceito da dinâmica procura-preço.....	9
2.4.2 Modelação da elasticidade da procura-preço	11
2.4.3 Estimativas sobre o parâmetro elasticidade da procura de eletricidade.....	13
2.5 Escolha da função objetivo para o problema de otimização.....	14
2.5.1 Redução da fatura do cliente: função custo	14
2.5.2 Redução da ponta nas redes: função de contribuição para a ponta.....	15
2.5.3 Maximização do lucro: função margem comercial	15
2.6 Influência de questões comportamentais no desenho de tarifas.....	16
3 Proposta de um método para determinação de períodos tarifários	17
3.1 Modelo de otimização de programação não linear inteira	17
3.1.1 Restrições de suficiência tarifária	18
3.1.2 Restrição funcional da resposta da procura ao preço	19
3.1.3 Restrições da estrutura de preços.....	19
3.1.4 Restrição da variável de classificação das horas	20
3.1.5 Restrição da variável de procura	20
3.1.6 Função objetivo	20
3.2 Heurística de resolução do problema	20
3.2.1 Restrições adicionais de tipo comportamental.....	22
4 Aplicação do método de determinação de períodos tarifários nas tarifas de eletricidade em Portugal	24
4.1 Descrição dos dados utilizados.....	24
4.2 Aplicação empírica.....	25
4.3 Implementação computacional.....	26
5 Análise dos resultados	27
5.1 Variação do perfil da procura em função da tarifa TOU	27
5.2 Análise dos períodos tarifários sugeridos pela heurística	28
5.2.1 Influência das restrições comportamentais de desenho tarifário	28
5.2.2 Períodos tarifários para diferentes grupos de consumidores	29
5.2.3 Análise de sensibilidade à elasticidade procura-preço	29
5.2.4 Análise de sensibilidade à função custo marginal	29
5.2.5 Análise de sensibilidade à função objetivo.....	30

5.3	Análise de resultados esperados em virtude da aplicação das tarifas TOU	30
5.4	Aspetos facilitadores da resposta da procura.....	32
5.5	Comparação com os períodos tarifários em vigor noutros países	32
6	Conclusões	34
	Bibliografia	36
	Anexo I – Estimador linear da receita para linearização do modelo	40
	Anexo II – Heurística de determinação dos períodos tarifários	42
	Anexo III – Caracterização da procura dos consumidores residenciais e pequenas empresas	44
	Anexo IV – Caracterização do perfil de custos marginais	45
	Anexo V – Quadros de resultados suplementares	49

Lista de figuras

Figura 1 – Preço médio das tarifas de eletricidade em Portugal continental em 2012.....	3
Figura 2 – Tipos de programas de <i>demand response</i>	5
Figura 3 – Estrutura das matrizes de elasticidade para vários tipos de resposta da procura	12
Figura 4 – Esquema da heurística de determinação de períodos tarifários na versão SNLE – iteração i	21
Figura 5 – Esquema da heurística de determinação de períodos tarifários na versão SLE – iteração i ..	22
Figura 6 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de um dia.....	24
Figura 7 – Parcelas do custo marginal de fornecimento (exemplo de um dia típico de inverno).....	25
Figura 8 – Impacte das tarifas TOU na curva da procura para 3 perfis de consumo (A, B e C)	27
Figura 9 – Sensibilidade da curva da procura a diferentes valores de elasticidade	28
Figura 10 – Valores da função objetivo no cenário base e no cenário alternativo	30
Figura 11 – Comportamento da função receita e da sua primeira derivada	41
Figura 12 - Pseudo-código do algoritmo de determinação dos períodos tarifários	43
Figura 13 – Ilustração da segunda componente da heurística (algoritmo <i>greedy</i>).....	44
Figura 14 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de um dia.....	45
Figura 15 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de uma semana	45
Figura 16 – Distribuição horária dos ponderadores dos custos incrementais de redes por período tarifário para um dado nível de tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)	47
Figura 17 – Composição do custo incremental total semi-horário de uso das redes utilizadas por um consumidor em Baixa Tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)	48
Figura 18 – Custos marginais de fornecimento horários, para um cliente em Baixa Tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)	48

Figura 19 – Custos marginais em cada meia hora	49
--	----

Lista de tabelas

Tabela I - Estimativas sobre o parâmetro elasticidade da procura	14
Tabela II – Restrições de desenho tarifário impostas ao modelo de otimização.....	23
Tabela III – Variações consideradas nos cenários de simulação.....	25
Tabela IV - Resultados obtidos com a limitação de 2 blocos de horas com p_2 e sem limitação.....	28
Tabela V - Resultados para os 3 perfis de consumo A, B e C, com o cenário base	29
Tabela VI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil C)	29
Tabela VII - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil C).....	30
Tabela VIII – Indicadores e resultados obtidos para os períodos tarifários obtidos por aplicação da heurística	31
Tabela IX – Períodos tarifários vigentes em vários países.....	33
Tabela X – Duração dos períodos tarifários considerada na construção do perfil dos custos marginais	48
Tabela XI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil A)	49
Tabela XII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil B)	49
Tabela XIII - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil A)	50
Tabela XIV - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil B).....	50
Tabela XV - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil A)	50
Tabela XVI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil B)	50
Tabela XVII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil C)	50
Tabela XVIII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil C com vários cenários de elasticidade).....	51

Tabela de siglas

AT – Alta Tensão (valores de tensão elétrica de fornecimento superiores a 45 kV).

BT – Baixa Tensão (valores de tensão elétrica de fornecimento de 230/400 V).

BTE – Baixa Tensão Especial (fornecimentos em BT com potência contratada superior a 41,4 kW).

BTN – Baixa Tensão Normal (fornecimentos em BT com potência contratada até 41,4 kVA).

CPP- *Critical Peak Pricing*.

EDF – Électricité de France.

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

MAT – Muito Alta Tensão (valores de tensão elétrica de fornecimento superiores a 110 kV).

MIBEL – Mercado Ibérico de Eletricidade.

MT – Média Tensão (valores de tensão elétrica de fornecimento superiores a 1 kV).

PL – Programação linear.

PNL – Programação não linear.

PNLI – Programação não linear inteira.

p.u. – Por unidade (refere-se a variáveis adimensionais, definidas em termos relativos).

RTP – *Real Time Pricing*.

SLE- Procedimento da heurística que inclui a resolução de um sistema de equações lineares.

SNLE- Procedimento da heurística que inclui a resolução de um sistema de equações não lineares.

TOU – *Time-of-use*.

Glossário

Cheias. Nome que se dá ao período tarifário de preços intermédios, no dia ou no ano. Pode também ser utilizado no contexto da procura significando o período de procura intermédia.

Critical peak pricing (CPP). Tipo de tarifa em que os preços atingem valores muito elevados durante um pequeno conjunto de horas, traduzindo momentos em que a procura condiciona o custo de forma crítica. Nas restantes horas do ano, os preços são fixados em valores inferiores. Este período crítico pode ser comunicado aos consumidores pouco tempo antes de acontecer.

Gestão da procura (*demand side management*). Conjunto de instrumentos de atuação ou de influência sobre a procura com o objetivo de beneficiar a gestão do sistema elétrico.

Fora-de-vazio. Nome que se dá a um conjunto de horas com características comuns, como um consumo elevado ou um custo marginal de produção elevado. Geralmente é utilizado relativamente a fenómenos globais (o consumo do sistema elétrico, por exemplo) e a este conjunto de horas é aplicada uma tarifa com um preço superior à média.

Período tarifário. Período temporal durante o qual o preço da tarifa é constante. Pode ser definido num só bloco (p.e.: 8-10h) ou em blocos separados (p.e.: 8-10h e 14-16h).

Ponta. Nome que se dá ao período tarifário de preços mais elevados no dia ou no ano. Pode também ser utilizado no contexto da procura significando o período de maior procura.

Real time pricing (RTP). Tipo de tarifa em que os preços variam em cada hora em função dos custos marginais de produção resultantes do mercado grossista. Os consumidores são avisados dos preços que ocorrerão no dia seguinte (indexação ao mercado diário). Esta tarifa exige meios avançados de contagem e de comunicação com o consumidor.

Smart meter. Contador de energia elétrica com funcionalidades sofisticadas assentes em eletrónica, que permite registar o consumo em cada hora, comunicar de forma bidirecional com o sistema central de contagem, comunicar com aparelhos de informação ao consumidor (*in-house displays*) e, eventualmente, agir automaticamente sobre os consumos ou reagir a alarmes e solicitações externas.

Tarifa. Conjunto de preços aplicados a variáveis de faturação e associados a um conjunto de regras de aplicação e pressupostos. A “tarifa bi-horária” tem 2 preços de energia, consoante a hora do consumo, e um preço fixo (função da potência contratada do cliente). A “tarifa bi-horária” pressupõe a existência de um contador de energia que separe o consumo nos 2 períodos tarifários (vazio e fora-de-vazio).

Time-of-use (TOU) ou time-of-day. Tipo de tarifa cujo preço é variável segundo períodos temporais de custo distinto, definidos segundo uma grelha horária. Cada período temporal é chamado período tarifário (são exemplos o período de ponta, período de vazio ou período de cheias). Durante o tempo de um período tarifário, a tarifa tem preços constantes.

Vazio. Nome que se dá a um conjunto de horas com um consumo reduzido ou um custo marginal de produção baixo. Geralmente é utilizado relativamente a fenómenos globais (o consumo do sistema elétrico, por exemplo) e a este conjunto de horas é aplicada uma tarifa com um preço inferior à média. Em Portugal, vigora uma subdivisão do período de vazio em dois períodos: vazio normal e super vazio.

Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL). Mercado de energia elétrica criado por decisão política dos Governos de Portugal e Espanha que tem por objetivos a harmonização e integração dos mercados retalhista e grossista, passando nomeadamente pela criação de um operador único dos mercados organizados para o dia seguinte e de derivados de energia elétrica e da determinação de várias linhas de convergência dos 2 setores elétricos.

Agradecimentos

O mais pequeno gesto é fruto do caminho que nos traz a esse momento. O nosso esforço deve portanto ser uma expressão de agradecimento a todos quantos nos apoiaram e motivaram a sermos melhores.

Reconheço e agradeço a compreensão, motivação e dedicação da orientadora deste trabalho, Professora Margarida Pato, não só pelo seu contributo para o resultado final mas também pelo exemplo de vida naquilo que é a sua interpretação da nobre profissão de professor, na entrega aos seus alunos.

À Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos e ao Professor Pedro Verdelho, agradeço a persistência na promoção do empenho e evolução dos colaboradores, apesar dos tempos de pouca esperança que atravessamos em Portugal.

Aos meus pais, António e Isabel, e à minha mulher, Matilde, pelo caminho que fizeram e fazem comigo, tenho que agradecer todos os dias.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO ATUAL DO SETOR ELÉTRICO NA EUROPA

Com o modelo legal do setor elétrico europeu, as atividades de transporte e distribuição são exercidas em monopólio e sujeitas à regulação económica, pelas entidades reguladoras. As atividades em concorrência (produção de energia e comercialização) estão apenas sujeitas à regulação comportamental (práticas comerciais, informação aos reguladores e ao mercado, obrigações de serviço público) e à regulação da concorrência (comum aos vários setores económicos).

No caso ibérico, Portugal e Espanha partilham um mercado organizado de energia, grossista, do qual fazem parte os mercados diário, de derivados e de serviços de sistema. Os dois primeiros estão integrados numa empresa ibérica (Operador do Mercado Ibérico de Eletricidade, OMIE) e o último é de âmbito nacional e operado pela Rede Elétrica Nacional (REN).

O mercado organizado comum é a face mais visível do Mercado Ibérico de Eletricidade – MIBEL, que deriva de um acordo político entre os Governos de Portugal e Espanha e inclui compromissos de harmonização de regras regulatórias e legislativas.

As sucessivas diretivas europeias do mercado interno da energia, culminando na publicação mais recente (de 2009) do chamado 3.º Pacote¹ legislativo da energia, têm por objetivo a criação de um mercado efetivo para a eletricidade e gás natural, onde as empresas e os consumidores de energia possam vender e comprar energia em toda a União Europeia. O mercado interno de energia implementa os 3 vetores estratégicos da política energética europeia (Comissão Europeia, 2010): a existência ininterrupta de produtos e serviços energéticos a preços comportáveis (através de um mercado concorrencial e da inovação da oferta de serviços de energia); a promoção da segurança de abastecimento à escala europeia (através da diversificação das fontes de aprovisionamento energético à Europa e promoção dos recursos endógenos); e a promoção da sustentabilidade social e ambiental (proporcionando um ambiente propício à inovação de produtos e serviços, com maior incorporação de tecnologia e competência técnica). O pano de fundo da política energética europeia é o objetivo de descarbonização da economia e da sociedade.

Uma das medidas incluídas no 3.º Pacote foi a promoção da participação da procura no mercado elétrico e, nomeadamente, a instalação de equipamentos facilitadores desta participação – os *smart meters*². Estes contadores inteligentes oferecem um salto tecnológico na relação entre o consumidor, a

¹ O 3.º Pacote é uma referência à 3.ª versão das diretivas do mercado interno do gás natural e da eletricidade (Parlamento Europeu e Conselho, 2009), bem como aos regulamentos europeus sobre matérias específicas (e.g., segurança de abastecimento).

² A Diretiva 2009/72/CE (Parlamento Europeu e Conselho, 2009) obriga expressamente os Estados-Membros a avaliarem e realizarem a implantação dos sistemas de medição inteligentes.

rede e o mercado elétrico, permitindo o conhecimento detalhado (com discriminação temporal) e atualizado (em tempo real) do consumo. Esta informação pode ser utilizada pelo próprio consumidor para gerir o seu consumo de energia; pelos operadores de rede para melhorar a gestão das redes e para envolver os consumidores na oferta de serviços de rede; e pelos comercializadores para desenvolver tarifas mais aderentes aos custos e mais indutoras de opções racionais de consumo {ver (Vasconcelos, 2008) para uma descrição mais detalhada dos benefícios dos *smart meters*}. Finalmente, a política europeia encara a dinamização da procura de energia através de *smart meters* como um contributo essencial para a concorrência e eficiência do mercado, a redução das emissões de CO₂ e o crescimento económico (Comissão Europeia, 2011).

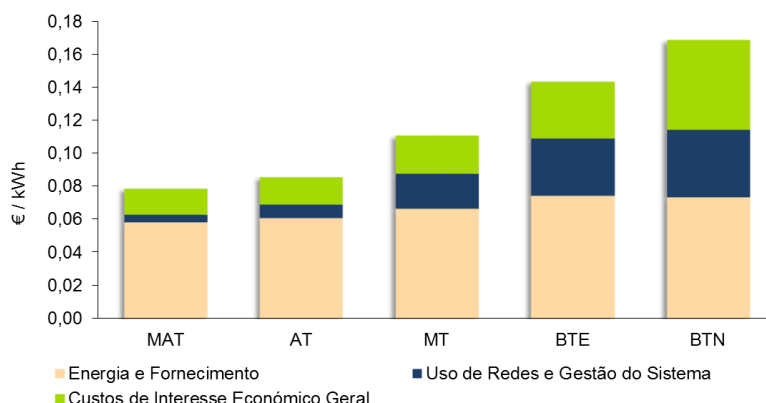
1.2 TARIFAS DE ELETRICIDADE

As tarifas de eletricidade pagas pelos consumidores finais traduzem os custos ao longo da cadeia de fornecimento, alguns de atividades reguladas (uso das redes de transporte e distribuição, custos oriundos de decisões políticas) e outros de natureza de mercado concorrencial (custos de produção e de retalho ou comercialização).

(Apolinário *et al.*, 2006a) apresentam o modelo tarifário português, dito aditivo, na medida em que as tarifas reguladas de acesso às redes são o resultado da adição das sub-tarifas por atividade que as compõem. Estas tarifas de acesso às redes são determinadas pelo regulador e aplicadas de igual forma a todos os consumidores, independentemente do seu comercializador final.

Neste modelo aditivo, a tarifa final resulta da soma das tarifas de acesso às redes com os custos de produção e com os custos de comercialização. Os custos de produção têm como referência o mercado organizado de energia. Os custos de comercialização são custos internos do comercializador.

A Figura 1 apresenta a composição da tarifa de venda a clientes finais em 2012, nomeadamente a componente regulada (uso das redes e gestão do sistema), a componente com origem nas decisões de política económica, social, fiscal e ambiental (custos de interesse económico geral), e a componente de mercado concorrencial (produção e comercialização). Esta composição varia com o grupo de consumidores, em função do seu uso efetivo das atividades da cadeia de fornecimento. Os custos de interesse económico geral têm uma repercussão tarifária definida por lei, não derivando diretamente do princípio do utilizador-pagador.



Fonte: (ERSE, 2011c)

Figura 1 – Preço médio das tarifas de eletricidade em Portugal continental em 2012

1.3 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E PERÍODOS TARIFÁRIOS

A ERSE define os períodos tarifários das tarifas de acesso às redes, consoante a dimensão do consumidor. Para os clientes residenciais e pequenas empresas (clientes de Baixa Tensão Normal, BTN), existem opções tarifárias de acesso às redes com diferenciação em 2 ou 3 períodos e a opção de tarifa simples (esta última é a mais comum, reunindo 85% dos clientes³).

Embora o mercado elétrico esteja totalmente liberalizado⁴, as ofertas tarifárias dos comercializadores de mercado estão de algum modo limitadas pelas características das tarifas reguladas de acesso às redes.

A informação discriminada de consumos por período tarifário está quase restrita aos consumidores que optaram por estas tarifas (embora essa opção seja livre e isenta de custos para o consumidor).

No passado, a tecnologia determinava que os contadores com registo discriminado do consumo por período do dia tinham custos acrescidos, bem como o tratamento dessa informação. (Bartusch *et al.*, 2011) comentam que essa situação condicionou a adoção destes sistemas de medição apenas por consumidores industriais e grande comércio. (Boiteux, Clemens & Clemens, 1964) apresentam a “tarifa verde”, uma das primeiras tarifas *time-of-use* (TOU) na Europa, implementada em 1956 pela Électricité de France (EDF), destinada aos grandes consumidores industriais.

Em Portugal, segundo dados da ERSE, no final do ano 2000 apenas 3% dos consumidores residenciais e pequenas empresas tinham tarifas TOU, tendo esse número evoluído bastante, até ao valor de 14%,

³ Ver (ERSE, 2011a).

⁴ Nos Açores e na Madeira a liberalização do mercado de eletricidade goza de um estatuto de região periférica, o qual permite a manutenção das tarifas reguladas de venda a clientes finais.

em 2011⁵. No caso dos consumidores industriais e grandes serviços, as tarifas *time-of-use* são obrigatórias desde, pelo menos, a década de 1970⁶.

Além da diferenciação de preços, as opções tarifárias de acesso às redes incluem ainda a escolha do ciclo de contagem, que corresponde à classificação de cada hora do dia num tipo de preço (ponta, cheia ou vazio). O ciclo pode ser diário (todos os dias da semana têm o mesmo perfil horário de preços) ou semanal (o perfil horário de preços é distinto para dias úteis, sábados ou domingos).

1.4 TARIFAS ADERENTES AOS CUSTOS MARGINAIS E PARTICIPAÇÃO DA PROCURA

(Houthakker, 1951) e (Boiteux, 1960)⁷ são dois dos trabalhos basilares da aplicação à eletricidade da teoria da tarifação ao custo marginal. Segundo os autores, as tarifas baseadas no custo marginal têm a grande vantagem de produzirem uma melhor distribuição dos recursos (eficiência económica) e induzir uma redução da procura em períodos de ponta, com os consequentes benefícios nos custos totais do setor elétrico (quer custos variáveis de produção quer custos de capacidade em meios de produção e em infraestruturas de rede). Esta visão assenta no pressuposto de racionalidade do consumo, pelo qual um consumidor irá utilizar eletricidade até ao ponto em que o custo desse consumo atinja o benefício marginal que pode retirar dele, ou seja, na dinâmica entre a procura e o preço⁸.

Para os consumidores, a utilização de preços marginais pode significar uma redução da fatura, caso consigam adaptar o seu consumo aos preços (Bartusch *et al.*, 2011), ganhar consciência sobre o consumo de energia e o seu custo e adotar tecnologias mais eficientes (Kim & Shcherbakova, 2011).

Para os operadores de redes, a aderência das tarifas aos custos marginais reduz os custos de gestão do sistema (serviços prestados por centrais em serviço de reserva), reduz as perdas nas redes e os custos de manutenção, permite o adiamento de novos investimentos e reduz o risco de interrupções de fornecimento. Ver (Bartusch *et al.*, 2011) e (Kim & Shcherbakova, 2011).

Para os comercializadores, estas tarifas proporcionam um ambiente de mercado mais concorrencial (com mais informação). (Bartusch *et al.*, 2011) referem ainda a redução do risco financeiro de fornecimento (dado que o comercializador efetua um contrato com o cliente para um determinado período, com preços fixos). (Faruqui, 2010) quantifica o prémio de risco incluído nas tarifas sem

⁵ A tarifa bi-horária residencial em Portugal tem mais de 700 mil clientes (ERSE, 2011a).

⁶ Para uma retrospectiva histórica das tarifas de eletricidade em Portugal ver (Bussola, 2010).

⁷ Este artigo corresponde à tradução e atualização de um primeiro artigo do mesmo autor, publicado em 1949 na *Revue Générale de l'Électricité*.

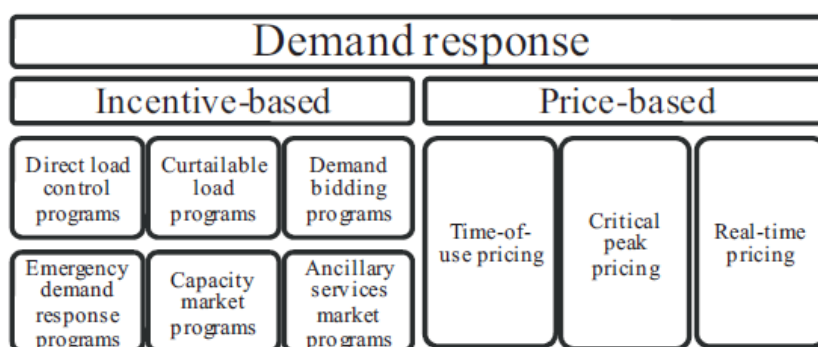
⁸ Houthackker refere a importância da participação da procura na solução do problema da ponta do consumo num contexto de limitação da capacidade de investimento no setor elétrico devido à situação do Reino Unido em 1951: pleno emprego, vocação de exportação, empenho num programa de rearmamento pós-guerra e escassez de habitação.

diferenciação de preços em cerca de 30%, podendo ser reduzido até 5% nas tarifas com preços dinâmicos.

Para a sociedade em geral, a utilização de tarifas de eletricidade aderentes aos custos marginais pode reduzir o potencial para o exercício de poder de mercado (aumentando a eficiência do mercado elétrico) e reduzir os impactos ambientais associados à produção e transporte de eletricidade (Bartusch *et al.*, 2011). Importa referir que o Regulamento Tarifário da ERSE determina que a estrutura das tarifas reguladas de eletricidade deve refletir a estrutura dos custos marginais.

A existência de tarifas cujos preços são dependentes do momento de utilização do serviço não é estranha aos consumidores. (Faruqui, 2010) refere os tarifários de parques de estacionamento (com preços dependentes da hora ou do dia, ou mesmo do número de lugares disponíveis), as portagens de pontes congestionadas, os preços dos voos (que são mais reduzidos no período noturno ou na época baixa) ou dos hotéis, os preços de alguns eventos culturais e desportivos ou ainda os preços das telecomunicações.

A dinâmica da procura de eletricidade tem sido objeto de diversos programas de incentivo aos consumidores com o objetivo de proporcionarem serviços ao sistema elétrico ou de reduzirem os custos globais do setor. Estes programas são chamados genericamente de *demand response*. (Dupont *et al.*, 2011) apresentam um esquema ilustrativo dos diferentes tipos de programas de *demand response* (Figura 2).



Fonte: (Dupont *et al.*, 2011)

Figura 2 – Tipos de programas de *demand response*

Dos programas identificados, destacamos as tarifas TOU que se constituem como um mecanismo de *demand response* muito comum no segmento de consumidores residenciais e são o objeto do presente trabalho. Adicionalmente, (Kim & Shcherbakova, 2011) referem que as tarifas TOU podem ser vistas como um passo necessário para a sensibilização dos consumidores para o custo de eletricidade variável no tempo, podendo depois ser complementadas com ofertas de tarifas mais dinâmicas, como as do tipo *critical peak pricing* ou *real time pricing*.

Introdução

As tarifas TOU apresentam preços variáveis no tempo, por blocos temporais, com um perfil diário, semanal ou sazonal. Estas tarifas são fixadas para um período e o consumidor sabe qual o preço que vigorará em cada hora para o futuro, em função da tabela definida na tarifa.

O estudo das tarifas dinâmicas tem sofrido rápidas evoluções na última década (Faruqui & Palmer, 2012), associado à evolução tecnológica e à redução de preço dos contadores de eletricidade. Esse impulso é ainda mais evidente na Europa, como consequência da promoção da instalação generalizada de *smart meters*.

Em Portugal, a fase de desenvolvimento do mercado não contribuiu ainda para o estudo de alternativas tarifárias inovadoras pelos agentes do setor. O principal contributo vem de um projeto-piloto em curso e que instalou cerca de 30 000 contadores inteligentes de eletricidade {sobre o projeto InovGrid ver (Prata *et al.*, 2011)}.

Este trabalho sobre determinação de tarifas em contexto de *smart metering* procura contribuir para o processo de alteração do mercado elétrico português face às novas tecnologias de medição que serão uma realidade generalizada na presente década.

2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Apesar dos muitos trabalhos visando a determinação de preços de eletricidade por período tarifário considerando a dinâmica procura-preço (elasticidade), a escolha dos períodos tarifários no tempo não tem tido investimento semelhante⁹.

No estado atual do setor elétrico na maioria dos países, a definição das partições temporais dos períodos tarifários (referidas simplesmente como “períodos tarifários”) para consumidores residenciais está fortemente limitada pelos equipamentos de medição. A modificação ou parametrização destes equipamentos são alvo de grande prudência por parte de todos os agentes do setor (Conselho Tarifário da ERSE, 2008).

Perante a generalização dos contadores inteligentes, as ofertas tarifárias poderão vir a ser diferenciadas quer em termos de preço ou dos serviços prestados, como atualmente, quer também em termos da grelha de períodos tarifários disponível. (Faruqui, 2010) defende que cada grupo de consumidores deve poder escolher a estrutura de tarifa à qual se consegue adaptar melhor, podendo existir ofertas diferenciadas pela duração do período de ponta ou pelo número de períodos tarifários.

A consideração de grupos de consumidores com parâmetros característicos de procura e de elasticidade como grupos alvo para a definição de opções tarifárias constitui uma das ideias chave do trabalho.

O presente trabalho final de mestrado tem por objetivo **propor uma ferramenta metodológica para determinar as partições horárias dos períodos tarifários e os respetivos preços, considerando diferentes grupos de consumidores caracterizados *a priori* e procurando o aproveitamento do potencial da resposta da procura de cada grupo e a manutenção da equidade entre todos os consumidores.**

2.2 MODELO UTILIZADO PELA ERSE NA DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS TARIFÁRIOS

Os períodos tarifários das tarifas de acesso às redes de energia elétrica em Portugal são definidos nos termos do Regulamento Tarifário. O Regulamento define a duração diária de cada período tarifário (a que corresponderá um preço distinto da tarifa), por tipo de dia (no caso do ciclo semanal).

Os períodos tarifários são definidos anualmente pela ERSE e a respetiva metodologia foi apresentada por (Apolinário *et al.*, 2005) e (Apolinário *et al.*, 2006b). A localização horária dos 4 períodos tarifários (ponta, cheias, vazio normal e super vazio) foi determinada de modo a minimizar o somatório dos

⁹ A pesquisa bibliográfica revelou poucos trabalhos com esta particularidade.

quadrados dos resíduos, calculados pela diferença entre a função de referência e o seu valor médio em cada período tarifário. Para funções de referência foram utilizadas as curvas de procura agregada no sistema elétrico português. O modelo não considera a resposta da procura à variação do preço.

Numa atualização apresentada em (ERSE, 2008), foi aplicada novamente a mesma metodologia embora utilizando também como funções de referência as curvas de preços horários no mercado grossista de eletricidade do MIBEL.

Na metodologia utilizada pela ERSE foram definidas algumas restrições externas ao modelo de otimização:

- Duração diária de cada período tarifário. A quantidade de horas diárias de cada patamar de preço está predefinida.
- Unidade temporal de análise: 30 minutos¹⁰. O dia foi analisado em 48 pontos.
- Período de ponta em 1 ou 2 blocos. No caso de 1 bloco, a duração do período é de 4 horas para o caso do ciclo de contagem semanal. No caso de 2 blocos, foram testadas as hipóteses de 2h mais 2h e de 1,5h mais 2,5h, ainda para o caso do ciclo de contagem semanal.

Importa referir que no referencial da metodologia da ERSE, os contadores de energia elétrica convencionais têm limitações que envolvem o número máximo de patamares de preço e de transições de preço bem como, e mais importante, condicionam a existência de soluções standardizadas de aplicação geral a todos os consumidores. Pelo contrário, no contexto do presente trabalho que é a existência de uma nova infraestrutura de medição e leitura de energia elétrica, associada aos *smart meters*, as limitações tecnológicas são muito reduzidas permitindo qualquer solução de períodos tarifários e que a sua localização dependa do grupo de consumidores ou da opção tarifária. Por isso, o presente trabalho avalia a localização dos períodos tarifários com uma menor influência das limitações referidas e adaptada às necessidades de cada grupo de consumidores.

2.3 MODELOS UTILIZADOS POR OUTRAS INSTITUIÇÕES NA DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS TARIFÁRIOS EM TARIFAS TOU

As limitações dos contadores geralmente utilizados pelos operadores do setor elétrico condicionam a estabilidade dos períodos tarifários aplicáveis aos consumidores, sobretudo consumidores residenciais e pequenas empresas. Este facto leva a que o perfil horário dos períodos tarifários seja frequentemente uma decisão regulatória tomada no passado que dificilmente é revista.

(Qiao & Li, 2011) referem que no setor elétrico da China os períodos tarifários são definidos com base em métodos empíricos de análise das curvas de procura agregada, sem uma base teórica e científica aprofundada. Os autores referem ainda a existência de métodos estatísticos do tipo análise fatorial e de função de pertença. Estes métodos não incorporam a dinâmica da procura-preço e são pouco flexíveis

¹⁰ Note-se que, como o custo marginal de produção é formulado em base horária no mercado grossista, os 2 períodos de 30 minutos partilham o mesmo valor na função de referência, quando esta é a função custo.

quanto à incorporação de restrições exógenas (como a dimensão mínima dos blocos de preço, por exemplo).

Em vários países, a determinação dos períodos de ponta das tarifas é delegada nos operadores de rede de distribuição, que atendem aos picos da procura nas redes para definir esse período.

Nos últimos anos, a discussão sobre períodos tarifários tem sido orientada para a definição de tarifas dinâmicas. (Faruqui & Palmer, 2012) e (Faruqui & Sergici, 2010) analisam várias experiências sobre tarifas dinâmicas realizadas na América do Norte, na Austrália e na Europa. Nestas tarifas, a identificação dos períodos críticos a sinalizar com preços elevados (e assim maximizar a resposta da procura) é feita em tempo real, associada a eventos particulares (pontas extremas de consumo devido a fenómenos climatéricos, indisponibilidade fortuita de meios de produção ou elementos de rede, picos de preço nos mercados grossistas). Esta definição em tempo real determina os períodos de preço elevado (ou outras formas de incentivo tarifário) em função do evento previsto, com pouca antecedência.

2.4 MODELAÇÃO DA DINÂMICA DA PROCURA

Face às metodologias em prática em Portugal, uma das mais relevantes diferenças do presente trabalho é a consideração da dinâmica da procura em relação ao preço, na fixação dos períodos tarifários. Para esse fim, é necessário definir um modelo matemático para essa dinâmica.

2.4.1 CONCEITO DA DINÂMICA PROCURA-PREÇO

O conceito económico da resposta da procura a variações do preço de eletricidade tem sido muito estudado e é hoje matéria de grande consenso. (EPRI, 2008) resume este consenso nos seguintes pontos:

- A elasticidade procura-preço manifesta-se numa redução geral do consumo de eletricidade quando o preço aumenta, numa transferência de consumo entre umas horas do dia e outras quando o diferencial de preços se altera, ou ambas.
- As estimativas da elasticidade derivadas de uma variedade de circunstâncias sugerem que o consumo de eletricidade no curto-prazo se reduz cerca de 10 a 20% quando o preço duplica.
- A crença generalizada de que apenas os grandes consumidores reagem aos preços é desmentida pelos estudos empíricos.
- Cerca de $\frac{3}{4}$ da resposta ao preço medida em testes empíricos é atribuível a $\frac{1}{4}$ dos participantes.
- O tipo de tarifa (*time-of-use*, *real time pricing*, *critical peak pricing*) pode influenciar a resposta da procura.
- As elasticidades procura-preço de eletricidade não são valores constantes mas sim influenciados pelo momento e nível de variação do preço.
- Aparentemente, a resposta ao preço poderá ser aumentada com recurso a novas soluções tecnológicas, eventualmente mais do que o que pode ser conseguido com tarifas complexas.

(EPRI, 2008) afirma ainda que uma grande parte dos consumidores demonstra reatividade ao preço, quando lhe é dada essa oportunidade, e que essa resposta é diferente entre indivíduos e entre grupos. Os resultados da resposta da procura podem ser estimados com confiança e precisão.

A elasticidade procura-preço está relacionada com a função utilidade do consumo de eletricidade. No pressuposto de utilização racional da energia, o consumidor só consome energia enquanto o seu custo for inferior à utilidade que retira dessa utilização. (Schweppe *et al.*, 1988) refere este pressuposto na forma: o consumidor racional escolhe o nível de procura que maximiza o seu benefício (utilidade menos o custo).

A resposta da procura a variações do preço de eletricidade passa por reajustar o nível de consumo, modificando o consumo global ou transferindo o consumo entre períodos de tempo com preços distintos¹¹. A aplicação destes conceitos no presente trabalho centra-se principalmente na transferência de consumos entre períodos tarifários, a partir da definição de tarifas *time-of-use*. A modificação estrutural da procura (transformação) tem sido perseguida por outros métodos, como a incorporação nos custos de fornecimento das externalidades ambientais¹² ou a aposta na informação dos consumidores sobre eficiência energética¹³.

No curto prazo, os consumidores utilizam a tecnologia disponível ou as modificações comportamentais ao alcance de modo a adaptar a procura a alterações do preço. Esta resposta de curto prazo está assim limitada.

Quando as alterações de preço de eletricidade permanecem no tempo, os consumidores ajustam a procura recorrendo a ferramentas adicionais, realizando investimentos em equipamentos mais eficientes como novas tecnologias de produção ou de utilização de energia ou em medidas de isolamento dos edifícios, procurando informação e formação sobre diferentes formas de utilizar a energia, ou alterando as formas de energia utilizadas nos processos.

Como resultado, a elasticidade da procura é superior no longo prazo face ao curto prazo. (EPRI, 2008) refere uma elasticidade própria de curto prazo de -0,3 face a -0,9 no longo prazo, para consumidores residenciais.

No trabalho considera-se apenas a elasticidade procura-preço de curto prazo, para aplicação ao desenho de tarifas *time-of-use*.

¹¹ São exemplos a aquisição de bens de consumo de eletricidade (aumento do consumo global) ou a escolha da hora do dia para efetuar lavagens de roupa ou de loiça em função do preço da eletricidade (transferência de consumos no tempo).

¹² Por exemplo, através do comércio europeu de licenças de emissão de CO₂ ou da imposição de medidas de mitigação de impactes ambientais da atividade de produção e transporte de eletricidade.

¹³ É o caso da rotulagem energética de equipamentos e edifícios, decisões legislativas associadas ao *phase-out* das lâmpadas incandescentes ou o desenvolvimento de campanhas de esclarecimento.

A elasticidade da procura de eletricidade é afetada por fatores culturais (como os hábitos e horários, as formas de energia utilizadas, os aspetos construtivos das habitações, o grau de informação sobre o consumo de energia ou a sensibilidade para a poupança de energia e impactes ambientais), climáticos (como a temperatura média e extrema), a taxa de posse de equipamentos elétricos ou o rendimento familiar. (Faruqui & George, 2005) referem a escolaridade dos consumidores, a posse de aparelho de ar condicionado ou a sazonalidade como fatores relevantes.

(Lijesen, 2007) apresenta uma revisão de estudos empíricos que apontam para diferenças entre a elasticidade em período de fora-de-vazio (consumo e preço mais elevados) e em período de vazio.

Esta diversidade manifesta-se entre países e regiões geográficas mas também entre tipos de consumidores (residenciais, comércio ou indústria) e entre grupos de consumidores. A maximização da resposta da procura deve assim passar por uma diversidade tarifária que se ajuste à diversidade da capacidade e apetência dos consumidores para responderem aos preços de eletricidade. (Faruqui & George, 2005) referem que esse conhecimento pode e deve ser utilizado pelas entidades públicas e pelas equipas de *marketing* dos comercializadores para desenhar tarifas de eletricidade que potenciem essa resposta.

2.4.2 MODELAÇÃO DA ELASTICIDADE DA PROCURA-PREÇO

(Schweppe *et al.*, 1988) identificam a função linear¹⁴ de resposta da procura $q_t = f(p_t)$ ao preço p_t num instante de tempo t , para um único preço e assumindo o parâmetro ε constante:

$$q_t = q_t^0 \cdot \left(1 + \frac{p_t - p_t^0}{p_t^0} \cdot \varepsilon\right), \text{ com } \varepsilon = \frac{\partial q_t / q_t^0}{\partial p_t / p_t^0} \text{ e com } q_t^0 \text{ e } p_t^0 \text{ as instâncias iniciais de } q_t \text{ e } p_t \quad (2.1)$$

Quando o preço varia no tempo, a procura pode ajustar-se entre períodos de preço distinto (transferindo consumos dos momentos de preços mais elevados para os momentos de preço mais reduzido). (Schweppe *et al.*, 1988) apresentam ainda um modelo linear discreto para a resposta da procura com 24 períodos de preço (generalizável para qualquer número de períodos):

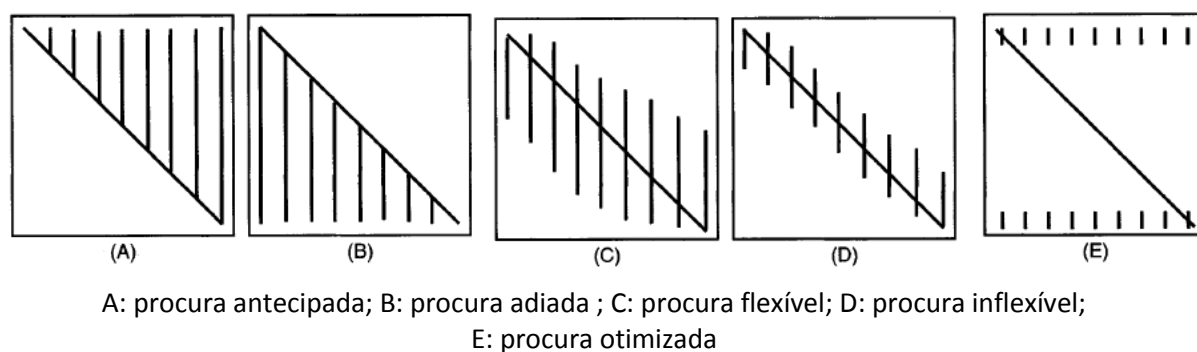
$$q_h = q_h^0 + \sum_{j=1}^{N=24} \varepsilon_{hj} \cdot \frac{p_j - p_j^0}{p_j^0} \cdot q_j^0 \quad \text{e} \quad \varepsilon_{hj} = \frac{\partial q_h / q_h^0}{\partial p_j / p_j^0}, \quad \text{com } h = 1, 2, \dots, 24 \quad (2.2)$$

$$\text{ou, } \begin{bmatrix} \Delta q_1 / q_1^0 \\ \vdots \\ \Delta q_N / q_N^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \cdots & \varepsilon_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{N1} & \cdots & \varepsilon_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta p_1 / p_1^0 \\ \vdots \\ \Delta p_N / p_N^0 \end{bmatrix} \quad \text{com } N = 24 \quad (2.3)$$

¹⁴ É referido no texto citado que várias formas estruturais da função utilidade (linear, polinomial, exponencial ou logarítmica) resultam na expressão linear de resposta da procura, em vizinhanças próximas de q_t^0 .

$[\varepsilon]$ é a matriz com a elasticidade cruzada da procura, ao preço e procura nominais. O elemento ε_{hj} é negativo se $h = j$ e positivo ou nulo caso contrário. $[\varepsilon]$ é uma matriz com valores negativos na diagonal principal (elasticidades próprias ou *self elasticities*) e valores positivos ou nulos nos restantes elementos (elasticidades cruzadas ou *cross elasticities*).

Como referem (Kirschen *et al.*, 2000), os elementos da matriz por cima da diagonal principal correspondem a alteração da procura por antecipação do consumo (olhando para os preços nos momentos seguintes) e os elementos da matriz por baixo da diagonal principal correspondem a alteração da procura por adiamento do consumo (em sequência dos preços nos momentos anteriores). Se o consumidor tem uma capacidade limitada de antecipar ou adiar consumos (no caso dos consumidores residenciais é frequentemente o caso), apenas os elementos mais próximos da diagonal principal terão valores não nulos. A Figura 3 ilustra vários tipos de consumidor através da sua matriz de elasticidade procura-preço característica.



Fonte: (Kirschen *et al.*, 2000)

Figura 3 – Estrutura das matrizes de elasticidade para vários tipos de resposta da procura

As primeiras matrizes apresentam os casos extremos de antecipação da procura (A) e adiamento da procura (B), face aos preços posteriores e anteriores, respetivamente. O caso (C) representa um consumidor real mas flexível, dado que a sua procura responde a preços anteriores e posteriores, e relativamente afastados. O caso (D) é de um cliente menos flexível, cuja resposta do consumo está condicionada pelos preços muito próximos do momento do consumo (banda de elasticidades muito apertada, junto à diagonal principal). Finalmente, o caso (E) representa um cliente que, nalgumas horas particulares (no início e no final do período), é sensível aos preços durante todo o período, podendo dizer-se que a procura nessas horas otimiza todo o perfil de preços no período.

Esta caracterização da matriz de elasticidades foi utilizada no trabalho, considerando que os consumidores incorporam nas decisões de consumo as variações de preço das horas mais próximas, anteriores e posteriores. Este ponto é um dos principais pilares do trabalho, na medida em que o modelo proposto permite a utilização de diversas matrizes de elasticidade, representando grupos de consumidores com características de consumo diferentes, e assim obter soluções tarifárias adequadas a cada grupo.

(Li & David, 1992) utilizam uma matriz de elasticidades procura-preço para um consumidor designado “real world” (consumidor real, por oposição a teórico) considerando que o consumo numa hora h apenas é influenciado pelos preços nas 2 horas anteriores e posteriores. Assim, a matriz de elasticidades tem zeros nos restantes elementos:

$$q_h = f(p_{h-2}, p_{h-1}, p_h, p_{h+1}, p_{h+2}) \quad (2.4)$$

De facto, o modelo linear da resposta da procura é muito comum em estudos tarifários - ver (Soon, 2011), (Nikzad *et al.*, 2012), ou (Kirschen *et al.*, 2000) - e pode ser apresentado como nas equações seguintes:

$$q_h = q_h^0 \cdot (1 + \Delta\%p_h \cdot \varepsilon_{hh}) + \sum_{j \neq h} q_j^0 \cdot (\Delta\%p_j \cdot \varepsilon_{hj}) \quad (2.5)$$

ou ainda,

$$q_h = q_h^0 \cdot \left(1 + \frac{p_h - p_h^0}{p_h^0} \cdot \varepsilon_{hh}\right) + \sum_{j \neq h} q_j^0 \cdot \left(\frac{p_j - p_j^0}{p_j^0} \cdot \varepsilon_{hj}\right) \quad (2.6)$$

Finalmente, como referido por (Kirschen *et al.*, 2000), existe um nível de preço a partir do qual se torna mais difícil reduzir a procura (seja pelas características da função utilidade seja pela necessidade de recorrer a medidas de investimento ou estruturais que não ocorrem no curto prazo). No modelo linear utilizado no trabalho, considera-se o pressuposto da validade do modelo na gama de variações de preço envolvidas.

2.4.3 ESTIMATIVAS SOBRE O PARÂMETRO ELASTICIDADE DA PROCURA DE ELETRICIDADE

Vários autores apresentam revisões bibliográficas sobre estimativas dos parâmetros de elasticidade da procura de eletricidade para consumidores residenciais. Apresentam-se em particular os valores para a elasticidade de curto prazo, por se adequar ao objetivo do trabalho (Tabela I).

Trabalhos concretos sobre a realidade portuguesa são raros e, como refere (Carmona, 2006), nem sempre apresentam resultados para uma estimativa da elasticidade procura-preço.

O mesmo facto é comentado pelos autores (Labandeira, Labeaga & López-Otero, 2012) sobre a situação em Espanha.

Tabela I - Estimativas sobre o parâmetro elasticidade da procura

Referência	Valores de elasticidade	Observações
(Fan & Hyndman, 2011)	-0,4 a -0,2 para a elasticidade de curto prazo e de -0,7 a -0,5 para a elasticidade de longo prazo	Apresenta estimativas para a elasticidade de curto prazo na Austrália ao longo do dia e com diversos níveis de procura. Os autores concluem que nos percentis mais elevados de procura o valor absoluto da elasticidade é mais reduzido.
(Lafferty <i>et al.</i> , 2001)	-0,2 para a elasticidade de curto prazo	Valor central dos estudos analisados.
(Faria & Vale, 2011)	-0,14 para a elasticidade de curto prazo dos consumidores residenciais	
(Steele Santos <i>et al.</i> , 2012)	-0,146 para a elasticidade de curto prazo	Valores para clientes residenciais no Brasil.
(EPRI, 2008)	-0,6 a -0,2 (com ponto central de -0,3) para a elasticidade própria de curto prazo. 0,04 a 0,11 (dependendo de eq. de ar condicionado), para a elasticidade cruzada.	Valores para consumidores residenciais obtidos a partir de diversos estudos realizados em diferentes estados norte americanos.
(Çelebi & Fuller, 2007)	-0,6 a -0,247 para a elasticidade própria (consoante se trata do período de vazio ou de ponta, respetivamente) e de 0,008 a 0,023 para a elasticidade cruzada	Os valores referem-se a um estudo sobre a elasticidade de curto prazo nos consumidores residenciais no Canadá.
(Labandeira, Labeaga & López-Otero, 2012)	-0,25 para a elasticidade de curto prazo nos consumidores residenciais e 0,05 para a elasticidade cruzada	Estudo sobre a situação em Espanha. Os autores corroboram que os consumidores residenciais são bastante mais sensíveis ao preço que a indústria ou o comércio.

Fontes: (Fan & Hyndman, 2011); (Lafferty *et al.*, 2001); (Faria & Vale, 2011); (Steele Santos *et al.*, 2012); (EPRI, 2008); (Çelebi & Fuller, 2007); (Labandeira, Labeaga & López-Otero, 2012)

2.5 ESCOLHA DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Quer o regulador quer os comercializadores têm responsabilidades na determinação de tarifas e do respetivo desenho estrutural (de que os períodos tarifários são uma peça importante). A função objetivo deve ser adequada ao fim pretendido para a tarifa a desenhar. Em seguida descrevem-se algumas hipóteses de funções objetivo para o modelo de otimização.

2.5.1 REDUÇÃO DA FATURA DO CLIENTE: FUNÇÃO CUSTO

Comercializadores e regulador concordam em definir um objetivo de minimização da fatura do cliente, se vier na sequência de uma correspondente redução dos custos provocados na produção de energia ou nas redes. Esta função objetivo é muito comum em estudos de otimização dos custos do sistema na perspetiva social, admitindo que a fatura reflete todos os custos de fornecimento de eletricidade, como referem os autores (Dupont *et al.*, 2011).

$$\min f_1(p_1, p_2) = \sum_h q_h \cdot c_h - C_{ref}, \text{ em que } q_h = f(p_1, p_2, q_h^0) \quad (2.7)$$

A função utiliza os preços de fora-de-vazio e vazio (p_1, p_2), a procura inicial (q_h^0) e o custo unitário de fornecimento em cada período h (c_h). C_{ref} corresponde à fatura do cliente nas condições iniciais.

O artigo citado define o custo de fornecimento c_h como sendo a soma dos custos de produção (mercado diário), transporte e distribuição e taxas e impostos (tarifas de acesso às redes), relativos ao setor elétrico na Bélgica.

Os custos de fornecimento de eletricidade variam ao longo do dia, desde logo devido aos custos de produção de energia (formulados em base horária em mercados organizados¹⁵) e devido aos custos com o uso das redes¹⁶. Estes custos com as redes estão associados aos novos investimentos para responder a incrementos do consumo bem como aos custos de operação e manutenção. Assim, através da metodologia de cálculo dos custos incrementais podem definir-se custos de uso das redes diferenciados em cada hora.

2.5.2 REDUÇÃO DA PONTA NAS REDES: FUNÇÃO DE CONTRIBUIÇÃO PARA A PONTA

Os custos de investimento nas redes são determinados pelo consumo em períodos de tempo curtos (o setor elétrico caracteriza-se por uma reduzida utilização da capacidade instalada) pelo que os operadores de rede e o regulador procuram encontrar períodos tarifários que induzam reduções de consumo nesses períodos críticos, com impactes no adiamento das necessidades de investimento e redução global dos custos. Neste caso, a função objetivo pode ser definida como o custo incremental de redes, horário, ou como uma função de probabilidade de contribuição para a ponta, com valores mais elevados nas horas de maior consumo.

$$\min f_2(p_1, p_2) = \sum_h q_h \cdot \mu_h - f_{ref}, \text{ em que } q_h = f(p_1, p_2, q_h^0) \quad (2.8)$$

A função utiliza os preços de fora-de-vazio e vazio (p_1, p_2) , a procura inicial (q_h^0) e a função de contribuição para a ponta em cada hora (μ_h) . Define-se um valor referencial f_{ref} da função objetivo, calculado para o perfil inicial de preços e de procura.

Define-se um vetor $[\mu_h]$ cujas componentes representam os valores de probabilidade, ou pesos, que associam incrementos de procura, em cada hora h , a uma conseqüente necessidade de investimentos nas redes ou de interrupção de consumidores. Ver (Steele Santos *et al.*, 2012) para a determinação do vetor $[\mu_h]$. Este vetor é um dado do problema de otimização e pode ser definido consoante o objetivo da simulação.

2.5.3 MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO: FUNÇÃO MARGEM COMERCIAL

É comum em estudos de otimização tarifária encontrar ainda a função objetivo lucro (diferença entre as receitas obtidas e os custos suportados pelos comercializadores), a maximizar na perspetiva dos prestadores do serviço de fornecimento de eletricidade.

¹⁵ No *website* do Conselho de Reguladores do MIBEL (www.mibel.com) é possível consultar informação sobre o mercado de eletricidade ibérico.

¹⁶ Para uma discussão do custo de fornecimento de eletricidade em Portugal ver (Apolinário *et al.*, 2006a).

$$\max f_3(p_1, p_2) = \sum_h q_h(p_h - c_h), \text{ em que } q_h = f(p_1, p_2, q_h^0) \quad (2.9)$$

2.6 INFLUÊNCIA DE QUESTÕES COMPORTAMENTAIS NO DESENHO DE TARIFAS

Qualquer modelo de otimização produz resultados cuja aplicação prática deve ser ponderada com razões de ordem comportamental. Em particular, se o modelo se destina a produzir incentivos aos utilizadores de um dado serviço, esses incentivos devem considerar a capacidade dos utilizadores responderem aos sinais ou estímulos. A título de exemplo, é frequentemente referido, em estudos sobre tarifas de eletricidade, que a tecnologia disponível é um *driver* da resposta do consumo, nomeadamente considerando a existência de equipamentos elétricos de funcionamento programável no tempo¹⁷.

Na área da mudança comportamental, são investigadas as potencialidades de novas tecnologias facilitarem a transferência de consumos dos períodos de ponta - ver (Dlamini & Cromieres, 2012) sobre aplicações de automação residencial, chamadas de *smart appliances*, ou ver (Weiller, 2011) sobre aplicações para veículos elétricos. São ainda estudadas novas formas de relação com o consumo de energia identificando e modificando práticas inadequadas - (Strengers, 2012) refere em particular o tema da climatização como foco de práticas comuns pouco cuidadas com o consumo de eletricidade.

Noutra frente, as tarifas de eletricidade devem ser desenhadas atendendo às características atuais da procura e às suas condicionantes comportamentais.

(Owen & Ward, 2010) indicam os princípios a considerar no desenho de tarifas “*smart*”: (i) elasticidade da procura ao preço; (ii) reflexão dos custos; (iii) equidade no acesso dos consumidores ao serviço público essencial que é o fornecimento de eletricidade; (iv) impacte em certos grupos de consumidores desprotegidos (consumidores de rendimentos reduzidos têm menor capacidade de reagir aos sinais preço, pelo menos através de ações que envolvam investimento inicial); (v) possibilidade de consequências não pretendidas como a alteração das fontes de energia (se resultar de uma distorção do preço); (vi) compreensão e aceitação pelos consumidores.

Sobre a aceitação das novas tarifas pelos consumidores, (Faruqi, Hledik & Sergici, 2009) sugerem os seguintes requisitos para o desenho tarifário: (i) neutralidade financeira das receitas proporcionadas pela tarifa; (ii) períodos de ponta curtos, facilitando a resposta dos consumidores pela alteração dos hábitos de consumo; (iii) grande diferença de preço entre ponta e vazio, reforçando o sinal económico; (iv) preços que reflitam os custos marginais; (v) oportunidade de obter poupanças significativas; (vi) simplicidade.

¹⁷ (Dlamini & Cromieres, 2012) referem que a capacidade de transferir o consumo entre períodos do dia é determinada pela existência potencial de um lapso de tempo entre a realização de um serviço e o consumo elétrico inerente a esse serviço, e que a tecnologia proporciona essa possibilidade. Os acumuladores de calor, que consomem energia de noite e mantêm a temperatura da habitação durante um dia são um exemplo concreto.

3 PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE PERÍODOS TARIFÁRIOS

O objetivo do método a propor no presente trabalho é a determinação de períodos tarifários, ou seja, a classificação de cada hora do dia por níveis de preços das tarifas de eletricidade, e a determinação destes preços. O método baseia-se num modelo de otimização.

Os custos de fornecimento de eletricidade variam no tempo e são condicionados pela procura agregada. As tarifas devem traduzir estes custos, alocando-os de forma adequada aos consumidores que os provocam, e ainda transmitir os sinais preço que incentivem uma resposta adequada da procura.

A influência dos preços de eletricidade no nível da procura expressa-se pela elasticidade procura-preço. Essa elasticidade relaciona variações de preço com consequentes variações da procura no mesmo momento, de sinal contrário. Adicionalmente, a procura numa dada hora relaciona-se ainda com o preço nas horas mais próximas, na medida em que os consumidores consigam transferir parte da procura no tempo, das horas de preço mais elevado para as horas de preço mais reduzido.

O modelo proposto procura encontrar a localização temporal ótima dos períodos tarifários, i.e., a distribuição dos patamares de preço pelas horas do dia, bem como os respetivos preços, que otimizam uma função objetivo escolhida (secção 3.1). Para encontrar solução para o problema desenvolveu-se uma heurística com duas versões (secção 3.1.5).

3.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA

Na presente secção descreve-se o modelo geral de otimização. Utilizou-se um modelo de programação não linear inteira, concretizado para 2 patamares de preços distintos: período de fora-de-vazio (p_1) e período de vazio (p_2). Considere-se o horizonte temporal H (1 dia), subdividido em subperíodos de tempo h (períodos de 30 minutos). As variáveis do modelo são os preços p_1 e p_2 , o vetor $[y_h]$ de associação de cada período a p_1 ou p_2 e a procura em cada período q_h .

$$\min f_1(p_1, p_2, [y_h]) = \sum_h q_h \cdot c_h - C_{ref} \quad (3.1)$$

$$\left| \begin{array}{l} \sum_h (1 - y_h)(q_h \cdot c_h - q_h \cdot p_1) = 0 \\ \sum_h y_h(q_h \cdot c_h - q_h \cdot p_2) = 0 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\quad (3.3)$$

$$s. a \quad \left| \begin{array}{l} q_h = q_h^0 + \sum_j q_j^0 \cdot \left\{ \varepsilon_{hj} \frac{[(1-y_j)p_1 + y_j p_2] - p^0}{p^0} \right\}, \text{ com } h \in H \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\quad p_1 \in [p^0, p_{\max}] \quad (3.5)$$

$$\quad p_2 \in [p_{\min}, p^0] \quad (3.6)$$

$$\quad y_h \in \{0,1\}, \text{ com } h \in H \quad (3.7)$$

$$\quad q_h \geq 0, \text{ com } h \in H \quad (3.8)$$

sendo,

y_h a variável de decisão sobre o preço aplicável a cada período h (0 para p_1 ou 1 para p_2)

p_1, p_2 as variáveis correspondentes aos preços finais (com diferenciação bi-horária)

q_h a procura no período de tempo h com os novos preços

dados,

p^0 o preço inicial (único)

q_h^0 a procura no período de tempo h com o preço inicial

c_h o custo unitário de fornecimento no período de tempo h

C_{ref} o custo de referência para as condições iniciais de procura e preço (fatura inicial)

$\varepsilon_{hh}, \varepsilon_{hj}$ a elasticidade procura-preço própria do período h (ε_{hh}) e cruzada entre h e j (ε_{hj}).

O modelo assume como condições iniciais a procura em cada período h e o preço inicial da tarifa (sem diferenciação horária). É ainda assumido um custo unitário em cada período h .

3.1.1 RESTRIÇÕES DE SUFICIÊNCIA TARIFÁRIA

As restrições (3.2) e (3.3) garantem que os preços em cada patamar, p_1 ou p_2 , são determinados tal que a receita que proporcionam seja igual ao custo de fornecimento. Ao aproximarem-se os preços dos custos marginais em cada período, promove-se uma solução económica que aumenta o bem estar social, como é referido na literatura sobre *marginal pricing* (Houthakker, 1951).

No caso do trabalho presente, considerou-se a fixação de tarifas no ponto ótimo social, traduzindo um mercado eficiente, em que a receita iguala o custo de fornecimento. Todavia, a metodologia proposta pode também ser utilizada com estas restrições na forma de desigualdades, em que, por exemplo, a receita seja superior ou igual ao custo (variação não negativa do lucro do fornecedor pela alteração dos preços). Essa alternativa traduz um objetivo diferente para a fixação das tarifas, associado à perspetiva de um agente de mercado individual, que maximiza o seu lucro.

Assume-se que o custo de fornecimento é invariante com a procura, na medida em que a tarifa a fixar se aplica apenas a um pequeno subconjunto de clientes, insuficiente para alterar significativamente a procura global¹⁸.

As restrições de suficiência tarifária (3.2) e (3.3) conferem uma característica não linear ao modelo proposto. A receita é uma função quadrática do preço, uma vez que q_h é função linear de p_1 e p_2 . No Anexo I apresenta-se um estudo da função receita. É ainda proposto um método de linearização da função receita. Esta linearização foi testada na fase de implementação como alternativa à modelização

¹⁸ Nota-se que, em geral, o custo de fornecimento depende da procura global, quer devido à natureza do custo marginal de produção (crescente com a procura a satisfazer) quer devido ao conceito de custo incremental de redes (que relaciona os incrementos da procura nos períodos de ponta com incrementos de custos de investimento nas redes). Ver (Heng & Li, 2007).

original. Acresce ainda a contribuição das variáveis binárias y_h para definição de termos não lineares nas restrições (3.4) (que multiplicam quer pelo preço quer pela procura).

3.1.2 RESTRIÇÃO FUNCIONAL DA RESPOSTA DA PROCURA AO PREÇO

As restrições (3.4) relacionam a procura em cada período de meia hora com a procura inicial, em função das elasticidades procura-preço próprias (no mesmo período de tempo) e cruzadas (entre períodos diferentes). As elasticidades próprias são negativas, logo, a procura no período h reduz-se quando aumenta o preço nesse período. As elasticidades cruzadas são positivas, logo, a procura no período h aumenta se aumentar o preço nos períodos contíguos, dado que os consumidores transferem consumos de uns períodos para os outros.

Como parâmetros da matriz de elasticidades, ε_{hj} , tomaram-se os seguintes valores:

- Elasticidade própria: o intervalo -0,4 a -0,1; sendo o cenário central: $\varepsilon_{hh} = -0,2$
- Elasticidade cruzada: o intervalo 0 a 0,1; sendo o cenário central: $\varepsilon_{hj} = 0,05$. Considerou-se no cenário base que a quantidade num dado período apenas é influenciada pelos preços nas 2 horas anteriores e posteriores.

O valor do coeficiente de elasticidade cruzada relativo a cada período h (ε_{hj}), tem em consideração o número de horas em que o preço p_j contribui para a procura q_h . O parâmetro da elasticidade cruzada, definido em cada cenário, corresponde à contribuição total de todos os períodos na procura do período h , à exceção do próprio período h . Por isso, em cada cenário, os coeficientes de elasticidade cruzada de cada período foram determinados tal que a sua soma corresponda ao parâmetro definido para a elasticidade cruzada total.

Os intervalos de valores de elasticidade foram usados quer para testar a sensibilidade dos resultados do modelo ao parâmetro, quer para simular diferentes segmentos de clientes residenciais, com características próprias, para os quais podem ser desenhadas ofertas tarifárias específicas. Foi ainda avaliado um cenário de elasticidade da procura variável ao longo do dia, representando a maior ou menor inércia do consumo residencial ao longo do dia. A este cenário chamou-se elasticidade otimizada.

3.1.3 RESTRIÇÕES DA ESTRUTURA DE PREÇOS

As restrições (3.5) e (3.6) definem a estrutura dos preços, em particular que o preço p_1 é superior ou igual ao preço inicial p^0 (preço uniforme ao longo do dia) e que o p_2 é inferior ou igual ao preço inicial. Definem ainda que os preços se encontram dentro da banda de custos marginais de fornecimento considerados (p_{max} e p_{min} correspondem aos valores extremos dos custos marginais). Os limitadores aos preços são utilizados também devido à linearidade do modelo da procura que pode conduzir a resultados extremos e que importa evitar (Faria & Vale, 2011).

3.1.4 RESTRIÇÃO DA VARIÁVEL DE CLASSIFICAÇÃO DAS HORAS

Define-se que cada período tem que ser classificado como pertencendo ao preço p_1 ou ao preço p_2 , na expressão (3.7).

3.1.5 RESTRIÇÃO DA VARIÁVEL DE PROCURA

Define-se que a procura em cada período é um número real não negativo, na expressão (3.8).

3.1.6 FUNÇÃO OBJETIVO

$$\min f_1(p_1, p_2, [y_h]) = \sum_h q_h \cdot c_h - C_{ref}, \text{ em que } C_{ref} \text{ é constante} \quad (3.8)$$

Das funções objetivo descritas na secção anterior, escolheu-se utilizar neste trabalho a minimização do custo para a empresa (e também o custo para o cliente, devido às restrições de igualdade 3.2 e 3.3), como descrito na secção 2.5.1. Note-se que no pressuposto de tarifas aderentes aos custos e de um mercado eficiente a formular esses custos, a redução do custo para o cliente final corresponde a uma redução global dos custos em toda a cadeia de fornecimento, incluindo os impactes ambientais provocados.

Na análise de sensibilidade efetuada ao modelo foram considerados 2 vetores de custo, $[c_h]$, alternativos (os resultados são comparados no ponto 5.2.4). Foi ainda considerada uma segunda hipótese de função objetivo, a função de contribuição para a ponta da procura agregada na rede de distribuição, como descrita na secção 2.5.2 (os resultados são comparados na secção 5.2.5).

3.2 HEURÍSTICA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

O problema original do tipo PNLI (*Nonlinear 0-1 Programming*) é de resolução difícil pela sua natureza dita *non-smooth* e discreta {ver (Li & Sun, 2006) sobre características dos problemas que os tornam de difícil resolução}. O problema tem 98 variáveis, das quais p_1 e p_2 , reais, q_1 a q_{48} , reais e y_1 a y_{48} , binárias. Foi usado o *solver Risk Solver Platform v11.5*, da Frontline Systems, Inc. (Frontline Systems, 2011), correndo juntamente com o Microsoft Excel 2010. Este *solver* demonstrou dificuldade em obter soluções para o problema e foi possível verificar empiricamente a existência de melhores soluções do que as encontradas pelo *solver*.

Em função dos maus resultados obtidos pela resolução do PNLI com o *solver*, verificou-se a necessidade de desenvolver uma heurística¹⁹ para definir os preços e a localização dos períodos tarifários. Esta heurística construtiva remove as variáveis inteiras, fixando-as através de um algoritmo *greedy* que chama um procedimento SNLE ou SLE. O Anexo II apresenta em detalhe a heurística utilizada. Sobre heurísticas de otimização ver, por exemplo, (Reeves, 1993).

¹⁹ Ver (Michalewicz & Fogel, 2004) sobre a motivação para a utilização de heurísticas.

Resumidamente, a heurística de determinação de períodos tarifários nas versões com SNLE e com SLE tem duas componentes:

- Procedimento de resolução de um sistema de equações não lineares (SNLE, ou SLE no caso em que recorre a um método numérico de resolução das equações) para determinar os preços p_1 e p_2 e o valor da função objetivo - expressões (3.2), (3.3) e (3.4) - com $[y_h]$ fixos, sujeito às restrições (3.5) e (3.6).
- Algoritmo *greedy* para procurar uma instância do vetor $[y_h]$ que melhore o valor da função objetivo.

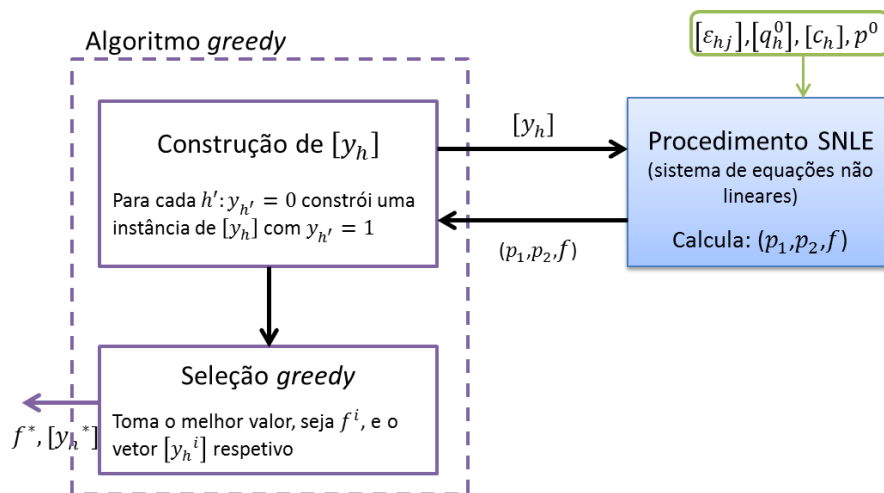


Figura 4 – Esquema da heurística de determinação de períodos tarifários na versão SNLE – iteração i

A Figura 4 apresenta uma iteração da heurística na versão SNLE. Para uma dada instância do vetor $[y_h]$, o procedimento SNLE obtém o valor de cada preço (p_1 e p_2 , solução única, como referido no Anexo I) e o valor da função objetivo (f), utilizando a procura inicial $[q_h^0]$ e o perfil de custos $[c_h]$ e incluindo uma retroação sobre a procura em função do perfil de preços definido (através da elasticidade procura-preço $[\varepsilon_{hj}]$), atendendo às restrições de receita (3.2 e 3.3).

O algoritmo *greedy* recria sucessivas instâncias do vetor $[y_h]$ que são aceites se melhoram o valor da função objetivo. De uma iteração para a seguinte apenas é alterada uma componente do vetor $[y_h]$.

Foi ainda utilizado um método alternativo para resolução do problema no qual a determinação dos preços se faz através de um sistema de equações lineares, recorrendo a um estimador linear da receita (ver no Anexo I), o procedimento SLE. A heurística na sua versão com SLE é apresentada na Figura 5, para uma iteração i . Após a fixação das variáveis binárias y_h , as restrições quadráticas de receita (3.2 e 3.3) são resolvidas por um método numérico de aproximação sequencial, como referido em (Schweppe *et al.*, 1988). Este método numérico introduz um novo ciclo (ciclo 2 na Figura 5), dentro do primeiro ciclo iterativo (ciclo 1) descrito no procedimento SNLE.

No ciclo 2, as equações de receita (3.2) e (3.3) são resolvidas admitindo que a procura é invariante com o preço, sendo obtidos os preços $(p_1, p_2)_m$ da sub-iteração m com um sistema de equações lineares.

Depois, a procura é recalculada com os preços resultantes e comparada com a procura da sub-iteração anterior. Se o desvio entre os valores da procura for superior a um valor estabelecido como critério de paragem predefinido, a procura é atualizada e os preços são recalculados, iterativamente. Este subprocesso continua até atingir o critério de paragem. Nessa altura está encontrado o valor da função objetivo pelo ciclo 2. A solução é avaliada com o algoritmo *greedy* (ciclo 1) juntamente com todas as soluções alternativas da mesma iteração i do ciclo 1.

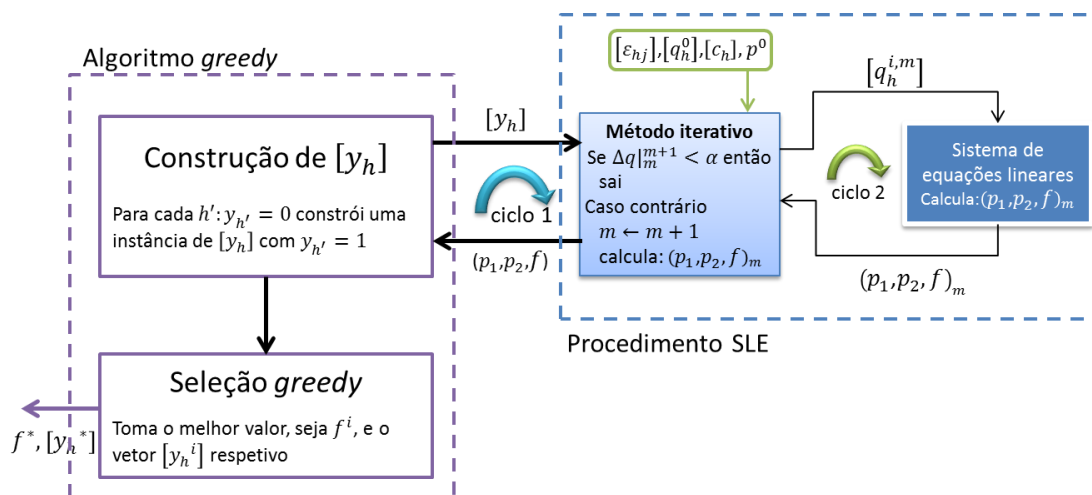


Figura 5 – Esquema da heurística de determinação de períodos tarifários na versão SLE – iteração i

3.2.1 RESTRIÇÕES ADICIONAIS DE TIPO COMPORTAMENTAL

Na heurística foram implementadas restrições adicionais de forma a incluir critérios de ordem comportamental. Esses critérios são definidos de modo a simplificar o conjunto de sinais preço apresentados aos consumidores. Podem também representar a restrições da procura em responder aos preços.

A heurística de determinação de períodos tarifários pode ainda ser utilizada para janelas de tempo distintas, consoante os objetivos do utilizador. Diferenciação dos dias do ano, por exemplo, por tipo de dia na semana (útil, fim-de-semana), ou efeito sazonal (mês de Agosto), são também possibilidades da metodologia.

Na experiência portuguesa de fixação de períodos tarifários este tipo de limitações é recorrente. Por um lado, os equipamentos de contagem atuais têm limitações que especificam o número máximo de blocos de preço e de transições diárias. Por outro lado, certos clientes têm maior facilidade em evitar consumir energia durante períodos de ponta contínuos (gerindo os turnos de produção, por exemplo). Outros clientes, com sistemas de climatização, por exemplo, conseguem usar a inércia térmica das suas instalações para evitar consumir em períodos de ponta relativamente curtos (com períodos alargados, a manutenção dos parâmetros ambientais dentro das gamas toleradas obriga a consumir energia nesses períodos).

As restrições adicionais apresentadas são fáceis de implementar na heurística. No modelo original PNLI a formulação destas restrições adicionais pode ser complexa e não traz vantagem ao trabalho dadas as conclusões sobre a não praticabilidade de utilizar o PNLI. Assim, apenas se consideraram estas restrições no procedimento de seleção *greedy* da heurística. Foram consideradas as restrições apresentadas na Tabela II.

Tabela II – Restrições de desenho tarifário impostas ao modelo de otimização

Característica	Restrição
Número máximo de blocos de horas de p_2	2
Duração mínima de um bloco único de horas de p_2	0h
Número máximo de horas do período tarifário p_2	24h

A consideração dos valores 0, para a segunda restrição, e 24, para a terceira restrição, equivale a tornar inativas essas restrições.

A possibilidade de definir este tipo de restrições confere uma grande flexibilidade ao método proposto neste trabalho.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PERÍODOS TARIFÁRIOS NAS TARIFAS DE ELETRICIDADE EM PORTUGAL

A aplicação do método heurístico proposto às tarifas de eletricidade em Portugal para clientes residenciais e pequenas empresas foi feita através da identificação dos custos marginais de fornecimento de energia elétrica em Portugal e da caracterização da procura segundo diferentes grupos de consumidores. A secção seguinte descreve os dados utilizados.

4.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

O método de determinação dos períodos tarifários foi aplicado a 3 grupos de consumidores, para determinar a grelha de preços mais adequada a cada grupo. Foram considerados 3 perfis de consumo característicos dos consumidores residenciais e pequenas empresas em Portugal (A, B, C). O modelo foi aplicado a 1 dia, de inverno (novembro a março), discriminado em períodos de 30 minutos. A Figura 6 exemplifica os perfis de consumo utilizados. A procura é descrita em pormenor no Anexo III.

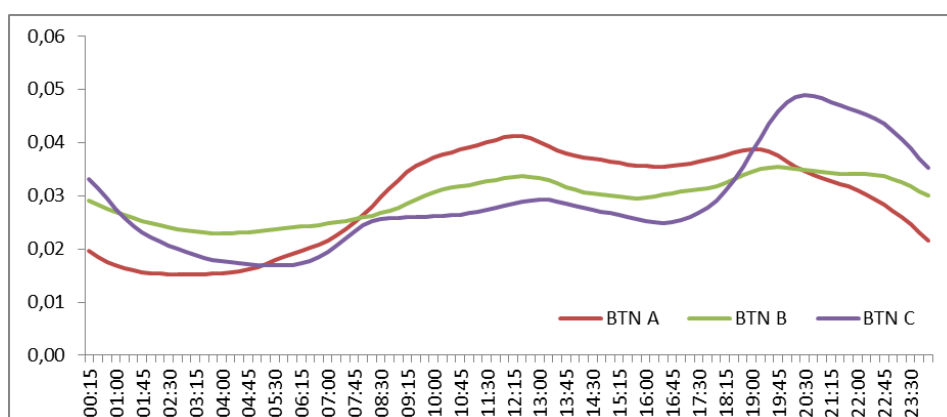


Figura 6 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de um dia

Fonte: ERSE

Em termos de consumo anual, foi considerado o valor de 5 000 kWh para qualquer dos perfis de consumo. Este valor serve apenas para dar uma expressão monetária à resposta da procura.

O custo marginal de fornecimento considerado no trabalho resulta da soma, em cada 30 minutos, dos custos marginais de produção e dos custos incrementais de transporte e distribuição. O método de determinação deste custo horário de fornecimento foi desenvolvido para este trabalho e é apresentado no Anexo IV.

Na definição da procura é possível analisar o consumo medido em diferentes grupos de consumidores. Pelo contrário, na determinação do custo marginal de fornecimento está envolvido um conjunto de decisões metodológicas e de pressupostos. A Figura 7 exemplifica o custo marginal de fornecimento utilizado.

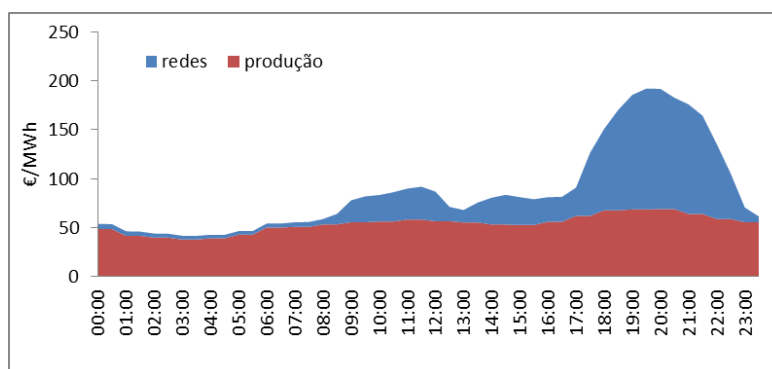


Figura 7 – Parcelas do custo marginal de fornecimento (exemplo de um dia típico de inverno)

Foi considerada uma variante metodológica para determinar um segundo perfil de custo marginal com o objetivo de analisar a sensibilidade dos resultados dos períodos tarifários a este parâmetro. Este perfil alternativo para o custo marginal é apresentado no Anexo IV.

4.2 APLICAÇÃO EMPÍRICA

Foram analisados diversos cenários, para aplicação do método de determinação de períodos tarifários. Cada cenário considerou um conjunto de elementos que foram alterados sucessivamente a fim de testar a sua influência nos períodos tarifários, nomeadamente, o perfil temporal do custo marginal de fornecimento, o perfil temporal da procura e os valores da matriz de elasticidades da procura - preço (elasticidade própria e cruzada). Foram consideradas as variações apresentadas na Tabela III.

Tabela III – Variações consideradas nos cenários de simulação

Parâmetro	Variações
Procura	Perfil de consumo A, B e C (dia médio de inverno - novembro a março)
Elasticidade procura-preço	Base: $\varepsilon_{hh} = -0,2$; $\varepsilon_{hj} = 0,05$; permanência = 2h ²⁰ Elevada: $\varepsilon_{hh} = -0,4$; $\varepsilon_{hj} = 0,1$; permanência = 4h Reduzida: $\varepsilon_{hh} = -0,1$; $\varepsilon_{hj} = 0$; permanência = 0h Otimizada: $\varepsilon_{hh} = -0,4$ (das 6h-9h e das 21h-24h) e $\varepsilon_{hh} = -0,1$ (nas outras horas); $\varepsilon_{hj} = 0,1$ (valor agregado das 6h-9h e das 21h-24h) e $\varepsilon_{hj} = 0,025$ (valor agregado nas outras horas); permanência = 2h
Custo	Base (custo marginal como descrito no Anexo IV) Alternativa (mais horas de ponta de procura da rede de distribuição)
Função objetivo	Base (como apresentado na secção 3.1.5) Alternativa (minimizar a contribuição para a ponta da rede de distribuição)
Restrições comportamentais	Base (como descrito na Tabela II) Alternativa (sem restrições comportamentais)

²⁰ O conceito de permanência foi discutido na secção 3.1.2 e refere-se ao “raio” de influência de um preço sobre a procura nas horas adjacentes aplicado à elasticidade cruzada.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A heurística de determinação dos períodos tarifários foi implementada em Microsoft Excel 2010, recorrendo ao módulo de programação (Visual Basic for Applications) e ao *solver* integrado no *software* Microsoft Excel 2010.

A heurística desenhada para resolver o problema original PNLI fixa iterativamente instâncias do vetor $[y_h^i]$. Com as variáveis binárias fixadas e sendo as restrições (3.2) e (3.3) de igualdade, a solução do problema obtém-se pela resolução de um sistema de equações não lineares. O *solver* é utilizado na resolução deste sistema de equações não lineares (procedimento SNLE).

No caso de se alterar a definição das restrições para inequações não lineares, o espaço de soluções do procedimento SNLE alarga-se, deixando de existir uma solução única, e a heurística passa a exigir a resolução de um sub-problema do tipo PNL. Nesta situação, o *solver* é especialmente útil. Assim, a utilização do *solver* no procedimento SNLE tem também a vantagem de poder acomodar outras formulações das restrições.

Na versão da heurística com um procedimento SLE, o *solver* é também utilizado mas na resolução do sistema de equações lineares. Neste caso, o *solver* resolve o sistema de equações composto pelas restrições (3.2) e (3.3), admitindo que a procura é invariante com os preços. Analogamente ao procedimento SNLE, caso se definam as restrições (3.2) e (3.3) como inequações, a heurística passa a incluir um sub-problema do tipo PL. Assim, o *solver* será usado na resolução desse sub-problema de PL, sem necessidade de alterar o método proposto.

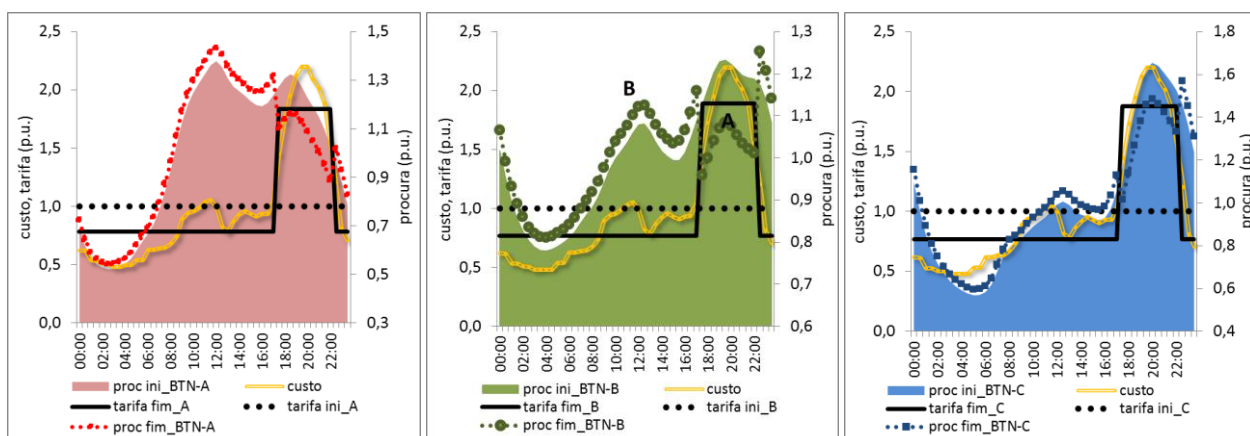
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos casos simulados são analisados de seguida em várias dimensões. As simulações recorreram à heurística na versão SNLE. Nas experiências preliminares realizadas, a utilização do estimador linear da receita (procedimento SLE) não revelou vantagens sobre a utilização do procedimento SNLE, quer em termos do tempo de computação quer da qualidade das soluções encontradas.

Em duas das simulações realizadas (cerca de 10% do total), foi possível verificar por experimentação a existência de uma solução admissível melhor do que aquela encontrada pela heurística. Para melhorar o seu desempenho repetiu-se a simulação retirando a restrição relativa à limitação do número de blocos de horas com o preço p_2 . As soluções encontradas pela heurística sem a restrição revelaram-se, *a posteriori*, cumpridoras da limitação referida pelo que foram utilizadas essas soluções como se fossem soluções do problema incluindo a restrição.

5.1 VARIAÇÃO DO PERFIL DA PROCURA EM FUNÇÃO DA TARIFA TOU

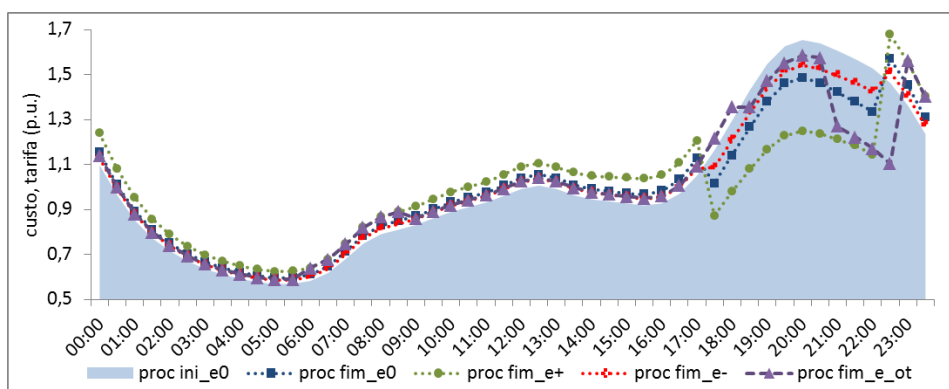
Um dos pressupostos do trabalho é a resposta (modificação do perfil) da procura em reação à modificação do perfil de preços. Na Figura 8 são apresentados os perfis de consumo iniciais e finais, representando diferentes grupos de consumidores bem como as tarifas iniciais e finais. É visível a modificação dos perfis horários de consumo em função da tarifa TOU (com 2 preços diferenciados) e do modelo de resposta da procura. Quando o preço da tarifa aumenta face ao valor inicial (valor em p.u. superior a 1) como no ponto A, a procura desce, transferindo-se para as horas mais próximas com preço inferior ao inicial. Quando o preço desce, como em B, passa-se o contrário. A transferência de consumos é particularmente notória quando o preço de ponta é muito superior ao preço inicial. Note-se que a procura diária total, que é obtida a partir do integral das curvas de procura, é praticamente invariante.



Legenda: proc ini – procura inicial; proc fim – procura final sujeita a tarifas TOU.

Figura 8 – Impacte das tarifas TOU na curva da procura para 3 perfis de consumo (A, B e C)

Se os grupos de consumidores tiverem parâmetros de resposta da procura distintos dos valores base assumidos, o perfil horário da procura será alterado de forma diferente. A Figura 9 apresenta a deformação da procura em função da aplicação de tarifas TOU no caso de uma procura mais elástica (“e+”) ou mais rígida (“e-”), face ao cenário base (“e0”). Apresenta ainda um perfil de procura resultante de um consumidor com uma elasticidade concentrada nos períodos da manhã (6h-9h) e da noite (21h-23h) e mais rígido nos restantes períodos (“e_ot”).



Legenda: *proc ini* – perfil inicial da procura; *proc fim* – perfil final da procura sujeita a tarifas TOU.

Figura 9 – Sensibilidade da curva da procura a diferentes valores de elasticidade

Os cenários mostram que a alteração da curva da procura depende da capacidade da sua resposta ao preço, a qual é um parâmetro variável de consumidor para consumidor. O método de determinação de períodos tarifários considera esta característica da procura, o que permite obter tarifas mais adequadas a cada grupo de consumidores.

5.2 ANÁLISE DOS PERÍODOS TARIFÁRIOS SUGERIDOS PELA HEURÍSTICA

5.2.1 INFLUÊNCIA DAS RESTRIÇÕES COMPORTAMENTAIS DE DESENHO TARIFÁRIO

Analisou-se a influência das restrições comportamentais impostas ao modelo de otimização, como definidas na secção 3.2.1. Como se verifica pelos resultados na Tabela IV, as restrições impostas não alteraram a localização dos períodos tarifários nos casos simulados (em cada caso A, B e C, os períodos não dependem da restrição). É espectável que esta conclusão se possa alterar quando se definem períodos tarifários num horizonte mais largo (por exemplo, semanal).

Tabela IV - Resultados obtidos com a limitação de 2 blocos de horas com p_2 e sem limitação

Procura	Restrições	Variação da fatura [€/ano]	Horário de ponta		
Perfil A	máx 2 blocos p2	-16,54	17:30 - 22:30	máx 2 blocos p2	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 100%; height: 10px; background: linear-gradient(to right, green 80%, red 20%);"></div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: red; margin-left: 5px;"></div> P1 </div>
	sem limitações	-16,54	17:30 - 22:30	sem limitações	
Perfil B	máx 2 blocos p2	-18,69	17:30 - 22:30	máx 2 blocos p2	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 100%; height: 10px; background: linear-gradient(to right, green 80%, red 20%);"></div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: green; margin-left: 5px;"></div> P2 </div>
	sem limitações	-18,69	17:30 - 22:30	sem limitações	
Perfil C	máx 2 blocos p2	-20,01	17:30 - 22:30	máx 2 blocos p2	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 100%; height: 10px; background: linear-gradient(to right, green 80%, red 20%);"></div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: green; margin-left: 5px;"></div> P2 </div>
	sem limitações	-20,01	17:30 - 22:30	sem limitações	

5.2.2 PERÍODOS TARIFÁRIOS PARA DIFERENTES GRUPOS DE CONSUMIDORES

As simulações para diferentes perfis de consumo, representando grupos de consumidores com características distintas, resultaram na sugestão de períodos tarifários com a mesma localização para os 3 casos A, B e C (Tabela V). As localizações propostas diferem da que vigora atualmente nas tarifas bi-horárias em Portugal, tendo um período de ponta bastante mais reduzido e a terminar meia hora mais tarde.

Tabela V - Resultados para os 3 perfis de consumo A, B e C, com o cenário base

Perfil (grupo consumidor)	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil A	-16,54	2,35	17:30 - 22:30
Perfil B	-18,69	2,47	17:30 - 22:30
Perfil C	-20,01	2,45	17:30 - 22:30
Tarifa bi-horária atual			8:00 - 22:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços

A tarifa bi-horária publicada pela ERSE foi alterada em 2009 e tem um período de ponta das 8 às 22 horas todos os dias do ano.

5.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À ELASTICIDADE PROCURA-PREÇO

Os resultados da análise de sensibilidade à elasticidade procura-preço revelaram que a localização dos períodos tarifários proposta é bastante insensível aos diferentes cenários de elasticidade (Tabela VI). Apenas num cenário “Otimizada” (consumidor com elasticidade da procura especialmente concentrada nos períodos das 6:00 às 9:00 e das 21:00 às 24:00) – se verificou um deslocamento do período de horas de ponta. Para os perfis de consumo A e B as conclusões são iguais (ver Anexo V). Apesar da não alteração dos períodos tarifários, a maior ou menor resposta da procura à variação do preço condiciona o retorno obtido pelo consumidor por redução da fatura, o qual depende bastante da sua predisposição para alterar o consumo.

Tabela VI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil C)

Perfil	Elasticidade	Variação da fatura [€/ano]	ε_{ii}	ε_{ij}	Perm [h]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil C	Base	-20,01	-0,2	0,05	2	2,45	17:30 - 22:30
Perfil C	Elevada	-45,25	-0,4	0,10	4	2,44	17:30 - 22:30
Perfil C	Reduzida	-12,07	-0,1	0,00	n.a.	2,45	17:30 - 22:30
Perfil C	Otimizada	-24,08	*	**	2	2,34	18:30 - 23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços; Perm - raio de permanência da elasticidade cruzada
 * -0,4 (6-9h e 21-24h); -0,1 (0-6h e 9-21h) ** 0,1 (6-9h e 21-24h); 0,025 (0-6h e 9-21h)

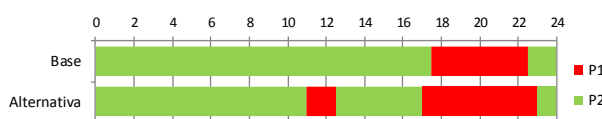
5.2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À FUNÇÃO CUSTO MARGINAL

A heurística *greedy* foi aplicada a uma curva de custos marginais alternativa, determinada a partir da associação do período de ponta da carga nas redes a mais horas por ano do que no cenário base. Estas durações são apresentadas no Anexo IV. A Tabela VII apresenta os resultados obtidos para os dois perfis de custo marginal aplicados ao perfil de consumo C.

Tabela VII - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil C)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil C	Base	-20,01	2,45	17:30 - 22:30
Perfil C	Alternativa	-8,47	1,84	11:00-12:30 17:00-23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços



Verifica-se que a localização dos períodos tarifários sugerida pela heurística difere nos dois cenários, constatando-se que a curva horária do custo marginal influencia os períodos tarifários fixados. Para os perfis de consumo A e B tira-se a mesma conclusão (ver Anexo V).

5.2.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À FUNÇÃO OBJETIVO

Na secção 2.5 foram discutidas várias alternativas para a função objetivo. Para testar a sensibilidade dos períodos tarifários à utilização de funções objetivo diferentes foi simulada a utilização da função objetivo que determina a contribuição para a ponta agregada da rede de distribuição de BT (como referido na secção 3.1.5). Esta função objetivo deve ser minimizada, dado que a redução da ponta da procura agregada nas redes induz adiamentos de investimentos e redução de custos operacionais, o que se reflete em reduções do custo global do fornecimento de eletricidade. A Figura 10 ilustra a evolução diária dos valores da função objetivo (a multiplicar pela procura em cada hora) quer no cenário base - f - (custo marginal de fornecimento) quer no cenário alternativo - f' - (contribuição para a ponta da rede).

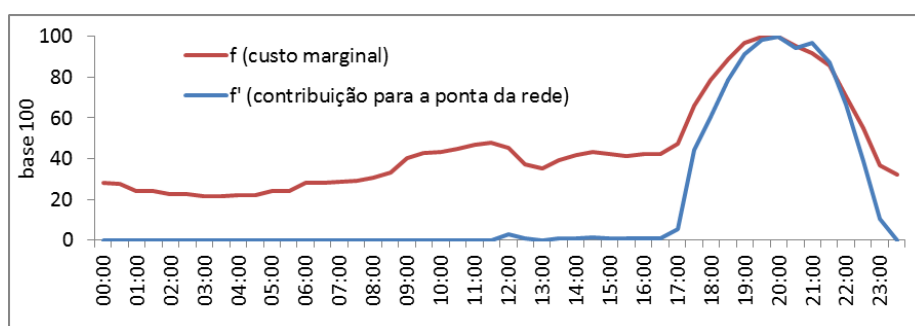


Figura 10 – Valores da função objetivo no cenário base e no cenário alternativo

Os resultados da aplicação das duas funções objetivo não revelaram alterações à proposta de períodos tarifários (ver Anexo V), nem variando a procura segundo os diversos grupos de consumidores nem o parâmetro de elasticidade da procura-preço.

5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS ESPERADOS EM VIRTUDE DA APLICAÇÃO DAS TARIFAS TOU

A Tabela VIII resume os principais resultados obtidos pela aplicação da heurística ao problema em estudo, com os cenários descritos na Tabela III. Para cada grupo de consumidores com um perfil de

consumo característico foram obtidos os períodos tarifários que otimizam a fatura anual considerando diferentes cenários de resposta da procura.

Para cada simulação apresenta-se o horário do período de ponta (preço p_1). O período de vazio (preço p_2) corresponde às restantes horas do dia, dado que foi imposta a restrição de um máximo de 2 blocos de horas contíguas de p_2 . Apresenta-se ainda um conjunto de indicadores: o rácio entre preços p_1 e p_2 ; a variação da fatura anual (em valor e em percentagem); a variação do valor máximo da procura entre as 18 e as 23 horas - período com 92% de probabilidade de conter a ponta da procura na rede de BT. A probabilidade foi determinada a partir da função de contribuição para a ponta apresentada na Figura 10.

No contexto dos dados simulados e com as opções tomadas, nomeadamente a definição de um único dia tipo para aplicação das tarifas no período de inverno, a localização dos períodos tarifários obtida por aplicação de uma heurística foi muito estável e quase coincidente nos vários cenários. O período das 17h30 às 22h30 foi quase sempre escolhido como localização do período de ponta, com exceção dos cenários em que a elasticidade da procura tem uma grande rigidez durante o dia e a madrugada e valores elevados entre as 6h e as 9h e entre as 21h e as 24h (elasticidade “Otimizada”).

Tabela VIII – Indicadores e resultados obtidos para os períodos tarifários obtidos por aplicação da heurística

Perfil de consumo	Elasticidade				Horário de ponta	P1/P2	Variação da fatura		Variação do máx procura 18-23h [%]
	Elasticidade	ε_{ii}	ε_{ij}	Perm [h]			[€/ano]	[%]	
Perfil A	Base	-0,2	0,05	2	17:30 - 22:30	2,35	-16,54	-3,1%	-12,5%
Perfil A	Elevada	-0,4	0,10	4	17:30 - 22:30	2,35	-36,73	-7,0%	-18,7%
Perfil A	Reduzida	-0,1	0,00	n.a.	17:30 - 22:30	2,35	-10,06	-1,9%	-7,5%
Perfil A	Otimizada	*	**	2	18:30 - 23:00	2,28	-18,92	-3,6%	1,6%
Perfil B	Base	-0,2	0,05	2	17:30 - 22:30	2,47	-18,69	-3,5%	1,6%
Perfil B	Elevada	-0,4	0,10	4	17:30 - 22:30	2,46	-41,32	-7,8%	8,0%
Perfil B	Reduzida	-0,1	0,00	n.a.	17:30 - 22:30	2,47	-11,43	-2,2%	-2,2%
Perfil B	Otimizada	*	**	2	18:30 - 23:00	2,39	-22,28	-4,2%	-2,6%
Perfil C	Base	-0,2	0,05	2	17:30 - 22:30	2,45	-20,01	-3,5%	-5,2%
Perfil C	Elevada	-0,4	0,10	4	17:30 - 22:30	2,44	-45,25	-8,0%	1,1%
Perfil C	Reduzida	-0,1	0,00	n.a.	17:30 - 22:30	2,45	-12,07	-2,1%	-6,8%
Perfil C	Otimizada	*	**	2	18:30 - 23:00	2,34	-24,08	-4,2%	-5,5%

* -0,4 (6-9h e 21-24h); -0,1 (0-6h e 9-21h) ** 0,1 (6-9h e 21-24h); 0,025 (0-6h e 9-21h)

Dos períodos tarifários definidos resultam preços p_1 e p_2 com uma relação de 2,5 para 1. Esta relação é superior à existente nas tarifas bi-horárias em vigor em 2012 (rácio de 1,9).

A resposta da procura de eletricidade a preços diferenciados durante o dia resulta em reduções da fatura anual dos clientes, em função da elasticidade da procura ao preço. Os resultados obtidos apresentam reduções de 1,9% a 8,0%. Os valores de faturação incluem apenas os custos marginais utilizados no trabalho (excluem impostos e termos fixos nas tarifas de fornecimento de eletricidade).

Para medir a modificação do perfil horário de consumo em resposta às tarifas TOU propostas pela heurística, avaliou-se a variação esperada do valor máximo atingido pela procura das 18h às 23h. A procura reage aos preços transferindo consumos do período de ponta para o período de vazio e isso é observado pela redução do valor máximo atingido no período referido na maioria dos casos simulados, face ao perfil de consumo inicial (com uma tarifa de preço único). Num dos casos simulados, a redução do máximo da procura no período crítico atingiu 18,7%. Em alguns casos, observa-se um aumento da procura máxima. (Bartusch *et al.*, 2011) referem a transferência do pico de consumo para horas de fora-de-vazio. Este fenómeno é visto com preocupação dada a possibilidade de tornar inadequada a tarifa definida, todavia, em geral, esta transferência não tem consequências negativas para o distribuidor na medida em que a curva agregada da procura é apenas marginalmente afetada pela alteração do consumo de certos grupos de clientes.

5.4 ASPETOS FACILITADORES DA RESPOSTA DA PROCURA

A aplicação de tarifas TOU deve ser acompanhada de medidas complementares de facilitação da resposta da procura. (Kim & Shcherbakova, 2011) referem a possibilidade de potenciar a resposta da procura com aparelhos eletrónicos de apresentação de informação sobre o consumo dentro de casa (*in-house displays*). Referem ainda que a resposta da procura é induzida por maiores diferenciais de preços entre ponta e vazio.

A implementação de tarifas TOU tem sido historicamente encarada de modo opcional à tarifa simples, mais comum. No entanto, (Friedman, 2011) refere que a tarifa de preço único é desajustada face às evoluções tecnológicas no domínio da medição de eletricidade e do controlo de equipamentos de consumo e face aos elevados custos de satisfazer os consumos em períodos de ponta e aos objetivos de redução de emissões de gases de efeito de estufa. Este autor defende assim a adoção obrigatória de tarifas com preços diferenciados segundo os custos marginais. Noutras indústrias de rede, como as telecomunicações, a existência de preços variáveis com a hora do dia é uma situação comum.

A consideração dos aspetos comportamentais é essencial na definição de estruturas tarifárias que reflitam os custos mas que facilitem a resposta da procura e se adaptem à capacidade e apetência dos vários grupos de consumidores de reagir aos sinais económicos dos preços.

5.5 COMPARAÇÃO COM OS PERÍODOS TARIFÁRIOS EM VIGOR NOUTROS PAÍSES

Na Tabela IX apresentam-se os períodos tarifários vigentes em vários países. Em geral, não se encontraram estudos de suporte a estes períodos tarifários, com exceção do caso português.

Tabela IX – Períodos tarifários vigentes em vários países

País	Períodos tarifários
Portugal	A tarifa bi-horária (ciclo diário) apresenta o período de ponta das 8:00 às 22:00.
Itália	A tarifa bi-horária regulada aplica-se a todos os clientes residenciais com contador multi-tarifa, com o período de ponta entre as 8:00 – 19:00, nos dias úteis.
Espanha	A tarifa noturna tem o período de ponta das 7h-23h (inverno) e 8h–24h (verão).
França	A tarifa bi-horária (tarife Bleu) tem o período de ponta no horário 6:00-22:00. A tarifa Tempo tem ainda uma forte discriminação segundo os dias do ano (“bleu”, “blanc”, “rouge”), sendo os dias vermelhos (22 dias por ano) de preço bastante elevado. As horas de ponta mantêm-se das 6:00 às 22:00.
Reino Unido	A tarifa Economy 7 tem 7 horas diárias de preço de vazio, definidas entre 22:00 e as 8:30, dependendo do local de consumo.
Califórnia	A tarifa TOU-D-T da Southern California Edison tem o período de ponta nos dias úteis, das 10:00 às 18:00.
Nova Zelândia	A tarifa Day/Night (uncontrolled) da Genesis Energy tem o período de ponta das 7:00 às 23:00.
S. Paulo - Brasil	A tarifa horo-sazonal da Bandeirante tem o período de ponta das 17:30 às 20:30.

A variedade dos períodos tarifários vigentes ilustrados na Tabela IX demonstra alguma inconsistência nas abordagens dos vários países.

Uma das comparações relevantes a fazer sobre os períodos tarifários obtidos neste trabalho é com as tarifas em vigor em Portugal. A ERSE define no Regulamento Tarifário uma duração diária dos períodos tarifários (14 horas diárias para o período fora-de-vazio, equivalente ao período de ponta definido pelo preço p_1). Esta grande duração do período de ponta quando comparado com os resultados obtidos com o método proposto neste trabalho (5 horas diárias) marca uma diferença digna de nota.

A combinação entre a escolha do período de ponta diário e de alguns dias de ponta por ano, observada em alguns dos países analisados, sugere um caminho de desenvolvimento adicional da metodologia proposta neste trabalho. Esta abordagem às tarifas do tipo *marginal cost pricing* é próxima de um tipo de tarifa definida como *critical peak pricing* (Faruqui, Hledik & Tsoukakls, 2009). Neste tipo de tarifas, os períodos de ponta são de curta duração e são definidos perto da data em que se aplicam, traduzindo a evolução real dos custos marginais com maior rigor e eficácia.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho final de mestrado propõe um método para a determinação de períodos tarifários nas tarifas de eletricidade para consumidores residenciais e pequenas empresas. Até 2020, assistir-se-á na Europa e no mundo à generalização da presença de contadores modernos (*smart meters*) de eletricidade nos clientes residenciais, com capacidades de registo do consumo e de interação com o consumidor muito superiores às atuais. A política energética na base desta generalização assume que estas potencialidades serão colocadas ao serviço dos consumidores, promovendo a sua resposta aos preços de eletricidade.

Os custos de fornecimento de eletricidade variam no tempo e são condicionados pela procura agregada. As tarifas fixadas pelos reguladores ou pelos comercializadores devem traduzir estes custos, alocando-os de forma adequada aos consumidores que os provocam, e ainda transmitir os sinais preço que incentivem uma resposta adequada da procura (assumindo a racionalidade das decisões de consumo).

Foi proposta uma nova metodologia que identifica as horas de ponta e de vazio e os respetivos preços, mediante o conhecimento dos custos marginais horários de fornecimento, do perfil da procura de determinados grupos de consumidores e dos respetivos parâmetros de elasticidade procura-preço. Esta metodologia baseia-se num modelo de otimização não linear com variáveis contínuas e variáveis binárias. Para determinar soluções para o problema foi desenvolvida uma heurística em duas versões. Os respetivos algoritmos foram implementados em MS Visual Basic for Applications, usando o *solver* integrado no MS Excel.

Para efeitos de aplicação da metodologia, foi ainda proposto um algoritmo de determinação do perfil horário dos custos marginais de fornecimento, a partir dos diagramas do consumo agregado nas redes, do custo marginal de produção no mercado grossista e dos custos incrementais de redes.

Alguns dos parâmetros utilizados não se baseiam em estimativas para a realidade portuguesa, dado que não estão disponíveis, e alguns dos pressupostos são simplificadores, dado o âmbito académico do trabalho. Assim, as conclusões retiradas prendem-se sobretudo com a validade do modelo e com a sua sensibilidade à alteração de parâmetros.

Os resultados obtidos mostraram que a melhor localização dos períodos tarifários é relativamente invariante com as restrições comportamentais impostas e com os 3 perfis de consumo utilizados. Embora mais sensíveis ao parâmetro de elasticidade procura-preço, os períodos tarifários só variaram quando se considerou uma elasticidade variável ao longo do dia e concentrada em alguns períodos curtos do dia. A localização dos períodos tarifários revelou-se muito sensível à curva de custos marginais de fornecimento. A utilização de funções objetivo diferentes não teve consequências nas localizações dos períodos tarifários propostas.

Conclusões

Nos cenários utilizados, a utilização de tarifas *time-of-use* com 2 preços diferenciados resultou na redução da fatura anual dos clientes entre 2 e 11% e na redução do pico do consumo no período de ponta até 21%. Estes valores ilustram que quer os consumidores finais quer os operadores de rede têm a ganhar com a eficiência induzida por este tipo de tarifa.

A aplicação do método de determinação de períodos tarifários a um dia tipo de inverno resulta na utilização de parâmetros médios de consumo, de custo e de elasticidade da procura, o que pode justificar parcialmente a estabilidade dos resultados. A utilização, por exemplo, de períodos tarifários diferentes consoante o dia da semana poderá mostrar mais diferenciação entre os cenários definidos.

Conclui-se que a metodologia proposta encontra resultados válidos. A consideração destes resultados pode suportar a fixação de períodos tarifários pelos agentes (regulador, comercializadores, operadores de rede). O método é também útil para estimar os benefícios obtidos pelos consumidores e pelo setor elétrico em resultado das opções tomadas, uma vez que incorpora a dinâmica da reação da procura à alteração dos preços. Face aos métodos atualmente utilizados em Portugal, o que foi proposto tem vantagens na flexibilidade de aplicação a diferentes grupos de consumidores e no facto de não definir à partida, arbitrariamente, as durações dos períodos tarifários em cada dia.

Esta abordagem poderá ser alargada em função da consideração de pressupostos diferentes. Pode ser definida a determinação de períodos tarifários com diferenciação semanal. A caracterização dos grupos alvo de consumidores para as tarifas a desenhar também deve ser melhorada, obtendo estimativas dos parâmetros de elasticidade para a realidade portuguesa e estudando a evolução dessa elasticidade ao longo do dia.

A heurística desenvolvida revelou algumas dificuldades em encontrar a solução ótima global, em instâncias particulares do problema. Como desenvolvimento poderá ser desenhada uma meta-heurística exploratória (baseada em pesquisa local) que procure ultrapassar alguns destes problemas. Isto será tanto mais relevante quanto maior a complexidade que se introduza na determinação dos períodos tarifários, dado que a interpretação crítica das soluções obtidas se torna mais difícil.

O estudo mais aprofundado dos custos marginais de fornecimento de eletricidade poderá dar mais informação para direccionar a metodologia de determinação de períodos tarifários, cujos resultados, como visto, dependem dos custos marginais utilizados.

Alguns autores estudaram a interação entre opções tarifárias com diferentes preços quando os clientes optam livremente pela melhor oferta (Ericson, 2011). Este efeito de coexistência de opções de tarifas também poderá ser estudado.

Bibliografia

- Apolinário, I., Felizardo, N., Garcia, A.L., Oliveira, P., Trindade, A., Vasconcelos, J. & Verdelho, P. (2005) Localização adequada de períodos horários para efeitos tarifários. Aplicação ao sistema eléctrico de Portugal Continental. In: *9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica*. 2005 Marbella.
- Apolinário, I., Felizardo, N., Garcia, A.L., Oliveira, P., Trindade, A. & Verdelho, P. (2006a) Additive Tariffs in the Electricity Sector. In: *IEEE Power Engineering Society - 2006 General Meeting*. 2006 Montréal, Canada.
- Apolinário, I., Felizardo, N., Leite Garcia, A., Oliveira, P., Trindade, A. & Verdelho, P. (2006b) Determination of Time-Of-Day Schedules in the Portuguese Electric Sector. In: *IEEE Power Engineering Society - 2006 General Meeting*. 2006 Montréal, Canada.
- Bartusch, C., Wallin, F., Odlare, M., Vassileva, I. & Wester, L. (2011) Introducing a demand-based electricity distribution tariff in the residential sector: Demand response and customer perception. *Energy Policy*. 39 (9), 5008–5025.
- Boiteux, M. (1960) Peak-Load Pricing. *The Journal of Business*. 33 (2), 157–179.
- Boiteux, M., Clemens, E.W. & Clemens, L.C. (1964) The Green Tariff of the Électricité de France. *Land Economics*. 40 (2), 185–197.
- Bussola, D. (2010) *Os primórdios da regulação em Portugal. A questão das tarifas de gás e electricidade em Lisboa no salazarismo (trabalho submetido ao Prémio ERSE 2010)*. [Online: <http://www.erse.pt/pt/imprensa/noticias/2010/Documents/Pr%C3%A9mio%20ERSE/Os%20prim%C3%B3rdios%20da%20regula%C3%A7%C3%A3o%20em%20Portugal%20-%20Diego%20Bussola.pdf>]
- Carmona, N. (2006) *Modelação econométrica da procura de electricidade em Portugal Continental: uma aplicação empírica (dissertação de mestrado)*. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Economia e Gestão.
- CER & NERA Consulting (2004) *Marginal Cost of Electricity Service Study*. [Online: http://www.nera.com/67_5050.htm]
- Comissão Europeia (2010) *Energia 2020. Estratégia para uma energia competitiva, sustentável e segura. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões*. COM(2010) 639
- Comissão Europeia (2011) *Redes inteligentes: da inovação à implantação. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões*. COM(2011) 202
- Conselho Tarifário da ERSE (2008) *Parecer sobre a Proposta de tarifas e preços para a energia eléctrica e outros serviços em 2009 e Parâmetros para o período de regulação 2009-2011*.
- Dlamini, N.G. & Cromieres, F. (2012) Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances. *Energy Policy*. 44,280–290.

- Dupont, B., Jonghe, C. De, Kessels, K. & Belmans, R. (2011) Short-term Consumer Benefits of Dynamic Pricing. In: *8th International Conference on the European Energy Market - EEM*. 2011 pp. 216–221.
- EPRI (2008) *Price Elasticity of Demand for Electricity: A Primer and Synthesis*. EPRI, Palo Alto, CA: 2007, 1016264.
- Ericson, T. (2011) Households' self-selection of dynamic electricity tariffs. *Applied Energy*. [Online] 88 (7), 2541–2547. Available from: doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.024.
- ERSE (2011a) *Caracterização da procura de energia elétrica em 2012*. [Online: www.erse.pt]
- ERSE (2005) *Caracterização dos diagramas de carga nas redes do SEP em 2004 (não publicado)*.
- ERSE (2011b) *Estrutura tarifária do setor elétrico em 2012*. [Online: www.erse.pt].
- ERSE (2008) *Localização de períodos tarifários no ciclo diário para 2009*. [Online: www.erse.pt].
- ERSE (2011c) *Tarifas e preços para a energia elétrica e outros serviços em 2012 e parâmetros para o período de regulação 2012-2014*. [Online: www.erse.pt].
- Fan, S. & Hyndman, R.J. (2011) The price elasticity of electricity demand in South Australia. *Energy Policy*. 39 (6), 3709–3719.
- Faria, P. & Vale, Z. (2011) Demand response in electrical energy supply : An optimal real time pricing approach. *Energy*. 36 (8), 5374–5384.
- Faruqui, A. (2010) The Ethics of Dynamic Pricing. *The Electricity Journal*. 23 (6), 13–27.
- Faruqui, A. & George, S. (2005) Quantifying Customer Response to Dynamic Pricing. *The Electricity Journal*. 18 (4), 53–63.
- Faruqui, A., Hledik, R. & Sergici, S. (2009) Piloting the Smart Grid. *The Electricity Journal*. 22 (7), 55–69.
- Faruqui, A., Hledik, R. & Tsoukakis, J. (2009) The Power of Dynamic Pricing. *The Electricity Journal*. 22 (3), 42–56.
- Faruqui, A. & Palmer, J. (2012) The Discovery of Price Responsiveness – A Survey of Experiments involving Dynamic Pricing of Electricity (submitted). *EDI Quarterly*.
- Faruqui, A. & Sergici, S. (2010) Household response to dynamic pricing of electricity : a survey of 15 experiments. *Journal of Regulatory Economics*. [Online] 38 (2), 193–225. Available from: doi:10.1007/s11149-010-9127-y.
- Friedman, L.S. (2011) The importance of marginal cost electricity pricing to the success of greenhouse gas reduction programs. *Energy Policy*. [Online] 39 (11), 7347–7360. Available from: doi:10.1016/j.enpol.2011.08.063 [Accessed: 2 November 2011].
- Frontline Systems (2011) *Frontline Solvers User Guide V11.5*.
- Heng, H.Y. & Li, F. (2007) Literature review of long-run marginal cost pricing and long-run incremental cost pricing. In: *Universities Power Engineering Conference UPEC 2007*. 2007 pp. 73–77.

Bibliografia

- Hillier, F. & Lieberman, G. (2010) *Introduction to Operations Research*. 9th edition. McGraw-Hill Higher Education.
- Houthakker, H.S. (1951) Electricity Tariffs in Theory and Practice. *The Economic Journal*. 61 (241), 1–25.
- Kim, J.-H. & Shcherbakova, A. (2011) Common failures of demand response. *Energy*. 36 (2), 873–880.
- Kirschen, D.S., Strbac, G., Cumperayot, P. & Mendes, D.D.P. (2000) Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices. *IEEE Transactions on Power Systems*. 15 (2), 612–617.
- Labandeira, X., Labeaga, J.M. & López-Otero, X. (2012) Estimation of elasticity price of electricity with incomplete information. *Energy Economics*. 34 (3), 627–633.
- Lafferty, R., Hunger, D., Ballard, J., Mahrenholz, G., Mead, D. & Bandera, D. (2001) *Demand Responsiveness in Electricity Markets*, Office of Markets, Tariffs and Rates (USA).
- Li, D. & Sun, X. (2006) *Nonlinear Integer Programming*. [Online]. Springer. Available from: doi:10.1007/0-387-32995-1.
- Li, Y.Z. & David, A.K. (1992) Consumer rationality assumptions in the real-time pricing of electricity. In: *IEE Proceedings-C*. 1992 pp. 315–322.
- Lijesen, M.G. (2007) The real-time price elasticity of electricity. *Energy Economics*. 29, 249–258.
- Michalewicz, Z. & Fogel, D.B. (2004) *How to Solve It: Modern Heuristics*. 2nd edition. Springer.
- Nikzad, M., Mozafari, B., Bashirvand, M., Solaymani, S. & Mohamad, A. (2012) Designing time-of-use program based on stochastic security constrained unit commitment considering reliability index. *Energy*. 41 (1), 541–548.
- Owen, G. & Ward, J. (2010) Smart Tariffs and Household Demand Response for Great Britain. *Response*.
- Parlamento Europeu e Conselho (2009) *Directiva 2009/72/CE*. 2008.
- Prata, R., Craveiro, H., Santos, C.A. & Quaresma, E. (2011) SmartGrid role in reducing electrical losses – the InovGrid experience. In: *CIREN 21st International Conference on Electricity Distribution*. 2011
- Qiao, H. & Li, Y. (2011) Research of peak and valley period partition approach on statistics. In: *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. July 2011 IEEE. pp. 1774–1779.
- Reeves, C.R. (1993) *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Colin R Reeves (ed.). New York, NY, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Schweppe, F.C., Tabors, R.D., Caraminis, M.C. & Bohn, R.E. (1988) *Spot pricing of electricity*. Kluwer Academic Publishers.
- Soon, W. (2011) A review of multi-product pricing models. *Applied Mathematics and Computation*. 217 (21), 8149–8165.

Bibliografia

- Steele Santos, P.E., Marangon Lima, J.W., Leme, R.C. & Leite Ferreira, T.G. (2012) Distribution charges for consumers and microgeneration considering load elasticity sensitivity. *Energy Economics*. 34 (2), 468–475.
- Strengers, Y. (2012) Peak electricity demand and social practice theories: Reframing the role of change agents in the energy sector. *Energy Policy*. 44,226–234.
- Vasconcelos, J. (2008) *Survey of Regulatory and Technological Developments Concerning Smart Metering in the European Union Electricity Market*, Robert Schuman Centre for Advanced Studies Policy Papers.
- Weiller, C. (2011) Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the United States. *Energy Policy*. 39 (6), 3766–3778.
- Yusta, J., Ramirez-Rosado, I., Dominguez-Navarro, J. & Perez-Vidal, J. (2005) Optimal electricity price calculation model for retailers in a deregulated market. *Electrical Power & Energy Systems*. 27 (5-6), 437–447.
- Çelebi, E. & Fuller, J.D. (2007) A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007 pp. 60–67.

ANEXO I – ESTIMADOR LINEAR DA RECEITA PARA LINEARIZAÇÃO DO MODELO

A linearização dos modelos frequentemente melhora a sua rapidez e capacidade de atingir soluções. No caso presente, a curva da receita varia quadraticamente com o preço num dado período tarifário. Para avaliar o impacto da não linearidade da função receita no problema de otimização realizou-se um estudo da função.

ESTUDO DA FUNÇÃO QUADRÁTICA DA RECEITA

O estudo do comportamento da função receita (função quadrática de p) pretende avaliar o resultado da otimização a partir desta função.

Dado que,

$$q = q^0 + \Delta q \quad e \quad \varepsilon = \frac{\Delta q/q^0}{\Delta p/p^0} \Leftrightarrow \Delta q = \varepsilon \cdot q^0 \cdot \Delta p/p^0$$

então,

$q = q_0 + \varepsilon \cdot q^0 \left(\frac{p}{p^0} - 1 \right)$, com q e q^0 as quantidades associadas aos preços p e p^0 , respetivamente. p^0 corresponde às condições iniciais e p às condições finais.

Assim, a receita R em cada bloco de meias horas com o mesmo preço p vem:

$$R(p) = q \cdot p = \left[q^0 + \varepsilon \cdot q^0 \left(\frac{p}{p^0} - 1 \right) \right] \cdot p = q^0 \cdot \left[p + \varepsilon \left(\frac{p^2}{p^0} - p \right) \right] \quad (A1)$$

A primeira e segunda derivadas parciais da receita são dadas por:

$$\frac{\partial R}{\partial p} = q^0 \cdot \left[1 - \varepsilon \left(1 - 2 \frac{p}{p^0} \right) \right] \rightarrow \frac{\partial R}{\partial p} \geq 0 \Leftrightarrow 1 - \varepsilon \left(1 - 2 \frac{p}{p^0} \right) \geq 0 \Leftrightarrow \frac{p}{p^0} \leq \frac{\varepsilon - 1}{2\varepsilon}, \text{ com } \varepsilon < 0 \quad (A2)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial p^2} = 2q^0 \frac{\varepsilon}{p^0} \leq 0, \text{ com } \varepsilon < 0 \quad (A3)$$

Na Figura 11 (derivada da receita) observa-se que para um dado valor de elasticidade própria, e com $p/p^0 \geq 0$, a derivada da receita é positiva e passa a negativa a partir de um dado valor do rácio de preços. p assume valores limitados por p_{max} (definido como o valor máximo do custo marginal de fornecimento em cada meia hora), pelo que p/p_0 não excede 2,07 nos casos simulados. Assim, para os valores referidos de p/p^0 e para valores de elasticidade típicos e utilizados neste trabalho (ver o ponto 3.1.2), a solução do sistema de equações não lineares (procedimento SNLE) é única pois a segunda solução da equação quadrática excede o domínio da variável p . Assim, para uma dada localização dos períodos tarifários (classificação de cada meia hora segundo o preço p_1 ou p_2) e considerando as restrições (3.2) e (3.3), a solução do problema é única.

Este racional é apresentado apenas considerando a elasticidade própria. No entanto, a consideração da elasticidade cruzada envolve os outros patamares de preço que não o preço utilizado em cada equação a multiplicar pela procura. Assim, dado que p_1 e p_2 são independentes, a função receita não é quadrática nesses termos de elasticidade cruzada.

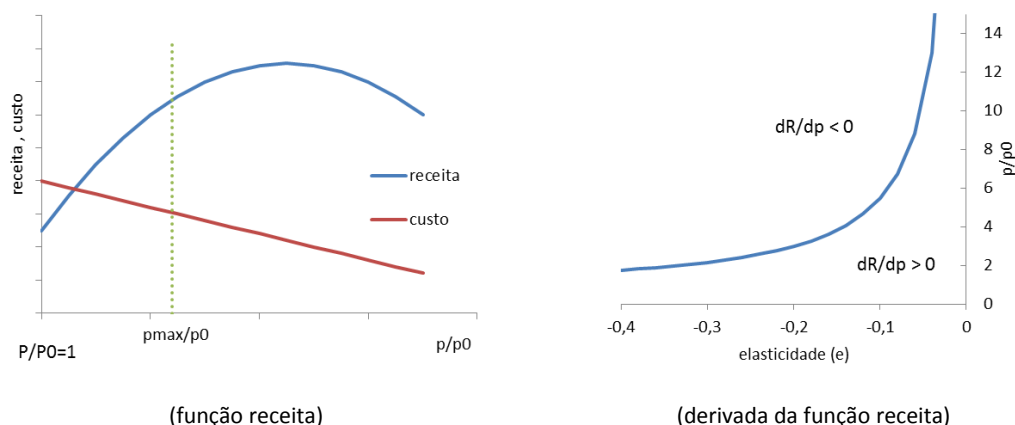


Figura 11 – Comportamento da função receita e da sua primeira derivada

ESTIMADOR LINEAR DA RECEITA

Considerou-se ainda uma linearização da restrição quadrática de receita para uma das versões da heurística. (Yusta *et al.*, 2005) refere também este problema da linearização da restrição. Para isso, utilizou-se um estimador linear para a receita e um método de aproximação numérica para obter a satisfação da restrição com um modelo linear.

Estimador linear da Receita:

$$(1) \text{Receita}^m = \sum_{\forall h} q_h^{m-1} \cdot p_h^m; \quad (2) q_h^m = q_h^0 + \varepsilon \cdot q_h^0 \left(\frac{p_h^m}{p_0} - 1 \right); \quad (3) \text{Receita}^{m+1} = \sum_{\forall h} q_h^m \cdot p_h^{m+1}$$

A receita é calculada iterativamente pelo procedimento SLE, através da resolução do sistema de equações lineares (1), a partir do vetor de procura calculado na iteração anterior (e, portanto, não afetada pela alteração marginal dos preços). Assim, em cada iteração a receita passa a ser função linear de p_h . Em seguida, é atualizado o vetor de procura para aquela que resulta do novo vetor de preços (2) e resolvido o sistema linear novamente (3). O processo é repetido até que a variação da receita entre 2 passos do cálculo não seja superior a um critério de paragem definido arbitrariamente.

(Schweppe *et al.*, 1988) identifica um procedimento iterativo semelhante, referindo ainda o uso de um multiplicador $\alpha \in [0,1]$, definido arbitrariamente tal que $q_h^{m+1} = q_h^m + \alpha [q_h(p_h^{m+1}) - q_h^m]$, sendo $q_h(p_h^{m+1})$ a determinação da procura q_h a partir da expressão (3.4). O multiplicador modera a variação de q_h entre uma iteração e a seguinte. Segundo o autor, este multiplicador destina-se a evitar a divergência do método numérico e toma valores tipicamente entre 0,3 e 0,6. No presente trabalho foi utilizado este método numérico e o multiplicador α foi fixado em 0,5.

ANEXO II – HEURÍSTICA DE DETERMINAÇÃO DOS PERÍODOS TARIFÁRIOS

A heurística de determinação dos períodos tarifários é um processo iterativo que tem duas componentes (ver Figura 4 e Figura 5 do capítulo 3):

- Procedimento para a resolução de um sistema de equações não lineares (em duas versões SNLE e SLE) para determinar os preços p_1 e p_2 e o valor da função objetivo - expressões (3.2), (3.3) e (3.4) - com $[y_h]$ fixos.
- Algoritmo *greedy* para procurar uma instância do vetor $[y_h]$ que melhore o valor da função objetivo.

Na primeira componente da heurística – procedimento SNLE ou SLE - são encontrados os valores de p_1 e p_2 que resolvem o sistema de equações composto pelas restrições (3.2), (3.3) e (3.4), otimizando o valor da função objetivo para uma definição concreta dos períodos tarifários (vetor $[y_h]$), sujeito às restrições definidas²¹. Na fase experimental do trabalho foram testados os dois métodos apresentados (SNLE e SLE).

Estes procedimentos utilizam a procura inicial e o perfil de custos e incluem uma retroação sobre a procura em função do perfil de preços definido (através da matriz de elasticidade procura-preço).

A função objetivo considera a fatura do cliente (ou receita da empresa), calculada como o produto dos preços em cada período tarifário (p_1 e p_2) pela procura final²². Ao minimizar o valor da função objetivo reduzem-se os custos de fornecimento (a procura transfere-se para períodos de menor custo) e aproximam-se os preços médios dos custos marginais em cada período.

Na segunda componente, a heurística constrói sucessivas instâncias do vetor $[y_h]$ em cada iteração, sendo os preços em cada instância determinados pela primeira componente. Em cada instância apenas é alterada uma das componentes do vetor $[y_h]$. Essas instâncias do vetor $[y_h]$ são aceites ou abandonadas consoante melhoram ou não o valor da função objetivo. Em cada iteração é tomada a instância de $[y_h]$ que melhor valor da função objetivo obtém, de entre todas as instâncias testadas nessa iteração (seleção *greedy*).

Este processo iterativo da heurística é repetido até que todos os períodos h tenham sido reclassificados pelo algoritmo ou até que nenhuma nova instância do vetor $[y_h]$ melhore a função objetivo.

ALGORITMO DE DETERMINAÇÃO DOS PERÍODOS TARIFÁRIOS

O algoritmo do tipo *greedy* classifica cada período h num determinado patamar de preço p_1 e p_2 ($y_h = 0$ ou 1). No vetor inicial o preço p_1 está atribuído a todas as horas ($y_h = 0$). Ao longo das iterações, o algoritmo *greedy* seleciona os períodos que ficam atribuídos ao preço p_2 , permitindo melhorar o valor da função objetivo.

A maior limitação de uma heurística *greedy* é, segundo (Hillier & Lieberman, 2010), o facto de estar delineada para descobrir apenas soluções admissíveis (sem qualquer garantia de descoberta da solução ótima). Essa limitação depende do andamento da função objetivo e, no caso presente, é mais relevante quando se adicionam muitas restrições (referidas como comportamentais na secção 3.2.1) do tipo discreto, como o número máximo de blocos de um dado preço, por exemplo.

²¹ Com a restrição de receita definida como restrição de igualdade, a solução (p_1^i, p_2^i) é única para cada $[y_h^i]$.

²² Nota-se que, com as restrições de igualdade entre custo e receita (3.2 e 3.3), a minimização da receita da empresa (fatura) equivale à minimização do custo. A vantagem de utilizar a segunda no cálculo da função objetivo é a invariância da procura com o custo unitário (ao contrário da procura com os preços de venda).

Para alguns casos simulados verificou-se por observação a existência de soluções admissíveis melhores do que aquela sugerida pela heurística com as restrições comportamentais. Nesses casos retiraram-se as restrições referidas e avaliou-se o resultado obtido sem elas: em todos esses casos o resultado obtido pela heurística correspondeu a dois blocos de preços de p_2 (e um bloco de preços de p_1), o que cumpre a restrição referida na Tabela II mesmo sem ter sido imposta na heurística.

A heurística foi implementada em *Visual Basic for Applications* (do Microsoft Excel 2010). Na figura seguinte apresenta-se o pseudo-código do algoritmo correspondente à heurística de determinação dos períodos tarifários utilizada no presente trabalho.

Algoritmo de determinação dos períodos tarifários

Inicialização

$[y_h^*] \leftarrow 0$ (configuração inicial dos períodos tarifários)

Determina f^* com todos os períodos h associados a p_1 (valor de referência da função objetivo)

$i = 1$ (iteração)

Passo 1 (construção de soluções $[y_h]$)

$[y_h] \leftarrow [y_h^*]$

Para cada meia hora h' Fazer:

Se $y_{h'} = 0$ Então: (h' está livre, ou seja, $y_{h'}$ não foi fixada)

constrói novo vetor $[y_h]$ com período h' alterado ($y_{h'} = 1$ associando h' a p_2)

(é possível adicionar restrições sobre a escolha de $[y_h]$, p.e., n.º máx. de blocos de horas com $p = p_2$, duração mín. de um bloco de horas)

Chama procedimento SNLE/SLE para determinar (p_1, p_2, f) com $[y_h]$

Passo 2 (seleção *greedy*)

Das soluções $[y_h]$ construídas no Passo 1, toma $[y_h^i]$ com valor f^i que minimiza a função objetivo

Se $f^i < f^*$ Então:

$f^* \leftarrow f^i$ (atualiza valor da função objetivo)

$[y_h^*] \leftarrow [y_h^i]$ (fixa um só período h no preço p_2)

Caso contrário: Termina (nenhuma instância de $[y_h^i]$ melhora f^*)

$i \leftarrow i + 1$

Se ainda existir uma meia hora h classificada como p_1 Volta ao passo 1

Termina

Figura 12 - Pseudo-código do algoritmo de determinação dos períodos tarifários

A Figura 13 apresenta uma ilustração gráfica da atuação do algoritmo *greedy* da heurística. O vetor de preços é iniciado com todos os períodos pertencentes ao preço p_1 . Depois, é classificado um período de meia hora de cada vez como p_2 e resolvido o procedimento SNLE ou SLE, que oferece a solução admissível e obtém o valor da função objetivo. A meia hora para a qual a alteração de p_1 para p_2 mais reduz o valor da função objetivo é incluída de forma definitiva no conjunto p_2 e o processo é recommçado numa nova iteração.

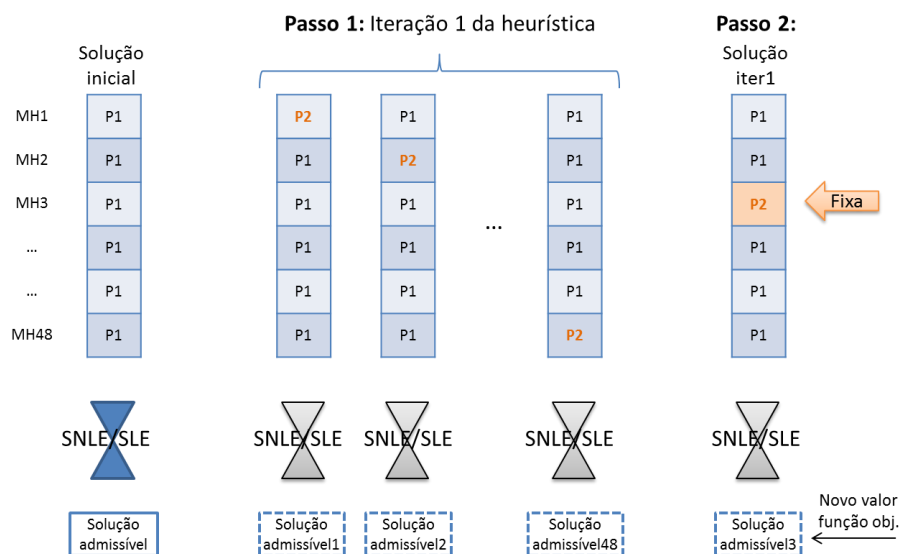


Figura 13 – Ilustração da segunda componente da heurística (algoritmo *greedy*)

ANEXO III – CARACTERIZAÇÃO DA PROCURA DOS CONSUMIDORES RESIDENCIAIS E PEQUENAS EMPRESAS

A procura discriminada hora a hora não é objeto de medição para os consumidores residenciais e pequenas empresas. Assim, o conhecimento da procura discriminada é obtido através de amostragem junto de clientes selecionados. Nessa amostra são colocados contadores com registo do consumo em cada período de 15 minutos e esses dados são sujeitos a tratamento estatístico. A partir desta amostra são definidos perfis de consumo característicos de determinados *clusters* de consumidores, que são utilizados no contexto do cálculo tarifário pela ERSE e pelos comercializadores de eletricidade. Os perfis de consumo padrão são publicados anualmente pela ERSE.

Para caracterizar os segmentos de consumidores utilizados no presente trabalho utilizaram-se os perfis de consumo para 2012, aprovados pela ERSE²³. Estes perfis estão divididos em 3 classes A, B e C, consoante as características de consumo (A para os maiores consumidores dentro do universo BTN e C para os consumidores residenciais de menor dimensão).

As figuras seguintes exemplificam os perfis de consumo padrão para um dia e uma semana exemplo.

²³ Diretiva n.º 4/2012, Diário da República n.º 16, Série II, de 23 de janeiro.

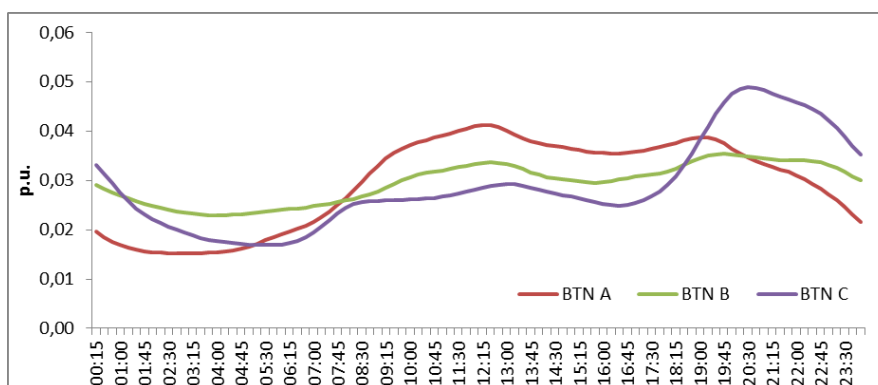


Figura 14 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de um dia

Fonte: ERSE

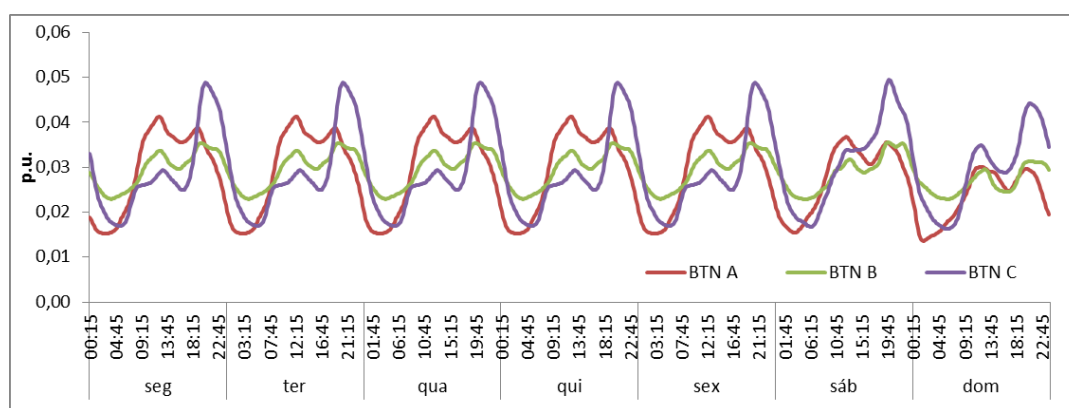


Figura 15 – Perfis de consumo utilizados nas simulações ao longo de uma semana

Fonte: ERSE

Os perfis de consumo padrão são adimensionais. Por isso, e para efeitos de utilização neste trabalho, foram multiplicados pelo consumo médio dos clientes com potência contratada de 6,9 kVA (cerca de 5 000 kWh²⁴). Este consumo médio não tem influência nos resultados das simulações, apenas serve para dar expressão monetária às reduções da função objetivo do problema. Os perfis de consumo são publicados com uma discriminação de 15 minutos pelo que foi necessário agregar os períodos correspondentes a cada 30 minutos.

ANEXO IV – CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE CUSTOS MARGINAIS

O custo de fornecimento considerado no trabalho resulta da soma, em cada período de 30 minutos, dos custos marginais de produção com os custos incrementais de redes de transporte e distribuição.

Para os custos marginais de produção foram utilizados os preços horários no mercado grossista diário (Operador do Mercado Ibérico de Eletricidade, OMIE), sem restrições técnicas nem custos dos serviços de sistema, na zona de preços portuguesa, durante o ano de 2011.

²⁴ Este nível de consumo equivale a uma fatura mensal de cerca de 75 euros, com os preços das tarifas em vigor em 2012.

Estes custos de produção são formulados pelo encontro das ofertas de venda (pelos produtores) com as ofertas de compra (pelos comercializadores), e têm por referencial um ponto virtual da rede de transporte. Devido às perdas elétricas no transporte e distribuição de energia, o custo marginal horário para fornecimento de eletricidade a um consumidor residencial deve ser obtido aplicando fatores de escala (coeficientes de ajustamento para perdas) em cada meia hora. Foram utilizados os valores dos coeficientes de ajustamento para perdas padrão publicados pela ERSE para 2011²⁵.

Relativamente aos custos incrementais de redes, não existe um mercado organizado ou outro mecanismo que revele os custos horários. Em alternativa, a ERSE e os operadores de redes realizam estudos de determinação dos custos incrementais de redes, para efeitos da determinação das tarifas de acesso às redes. A metodologia de determinação dos custos incrementais de redes seguida pela ERSE utiliza a energia consumida durante os períodos tarifários definidos, nomeadamente no período de ponta (a metodologia relaciona incrementos de procura no período de ponta com os incrementos de investimentos nos troços centrais das redes). Assim, a maioria dos custos incrementais de redes estão associados ao consumo no período de ponta (horas de procura mais elevada).

(CER & NERA Consulting, 2004) descreve um método de determinação de custos marginais totais de fornecimento de eletricidade na Irlanda.

MÉTODO DE CÁLCULO DOS CUSTOS INCREMENTAIS HORÁRIOS COM AS REDES DE TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO

Os métodos de cálculo dos custos incrementais associam o incremento de custos com as redes a incrementos de procura de energia nos períodos de maior consumo. No trabalho usou-se este pressuposto para definir o custo incremental de redes em cada meia hora do ano. O método utilizado considerou os seguintes passos, repetidos para a rede de transporte e para a rede de distribuição em cada nível de tensão:

1. Ordenaram-se as meias horas do ano com procura decrescente (procura agregada de todos os consumidores abastecidos pelas redes em cada nível de tensão: Muito Alta Tensão, Alta Tensão, Média Tensão e Baixa Tensão). O estudo (ERSE, 2005) analisou os diagramas característicos da procura nas redes de transporte e distribuição em 2004 e foi utilizado como fonte dos dados sobre a procura discriminada nas redes de cada nível de tensão.
2. O conjunto de meias horas com valores de procura acima de 80% da procura máxima foi classificado como ponta das redes (1100 horas anuais para MAT, AT e MT, e 560 horas na rede de BT). No estudo (CER & NERA Consulting, 2004) o período de ponta são cerca de 260 horas por ano enquanto no Regulamento Tarifário da ERSE o período de ponta tem uma duração entre 990 e 1460 horas anuais. As meias horas com o valor de procura mais elevado e inferior às meias horas de ponta são classificadas como período de horas cheias e sucessivamente para as meias horas de vazio normal de super vazio. Para as durações dos períodos de vazio, foi usada a duração definida pelo Regulamento Tarifário.
3. Para cada meia hora da semana ou do dia a definir, contam-se as meias horas homólogas ao longo do ano com a classificação de ponta, cheia, vazio normal e super vazio. Esta distribuição pelos períodos tarifários oferece os pesos percentuais que relacionam cada meia hora com esses períodos tarifários.

²⁵ Despacho n.º 1549/2011, Diário da República n.º 13, Série II, de 19 de janeiro.

4. Em cada meia hora, os pesos percentuais calculados no ponto anterior são multiplicados pelos custos incrementais de uso das redes do nível de tensão em questão²⁶, publicados pela ERSE para 2012 (ERSE, 2011b). Estes custos incrementais por período tarifário foram previamente multiplicados pelos fatores de ajustamento para perdas padrão em 2012, de modo a referenciar o preço para o nível de Baixa Tensão, onde o custo será aplicado aos fornecimentos. Em (Apolinário *et al.*, 2006a) encontra-se uma explicação mais detalhada sobre este pormenor do cálculo para referir os preços ao referencial de Baixa Tensão.
5. O produto referido no ponto anterior corresponde ao valor do custo incremental de cada meia hora do dia tipo, relativo ao uso das redes num determinado nível de tensão. O dia tipo é utilizado no problema de otimização, em particular, por exemplo, um dia típico de inverno ou uma semana típica de verão.
6. Para cada meia hora do dia tipo foram somados os custos incrementais horários de uso das redes em cada nível de tensão, determinados pelos passos anteriores. Dessa agregação resulta o custo incremental total de uso das redes utilizadas por um consumidor que é fornecido em Baixa Tensão e cuja energia é produzida em Muito Alta Tensão, tendo esta que percorrer toda a rede de transporte e distribuição nos diferentes níveis de tensão.

O custo incremental de redes associado ao período de ponta foi determinado a partir do preço de energia em horas de ponta da tarifa de uso das redes para cada nível de tensão e ainda da conversão para um preço de energia em horas de ponta do preço de potência média em horas de ponta publicado para cada nível de tensão.

Com o método descrito, determinam-se os custos incrementais de uso das redes em cada 30 minutos, para cada caso de aplicação da heurística de determinação dos períodos tarifários. Foram determinados os seguintes perfis de custos incrementais semi-horários de uso das redes:

- Diário (24h), verão e inverno.
- Semanal (7x24h), verão e inverno.

A Figura 16 apresenta os resultados do passo 3 do método utilizado, que determina para cada meia hora o peso correspondente do custo incremental de redes calculado pela ERSE para cada período tarifário.

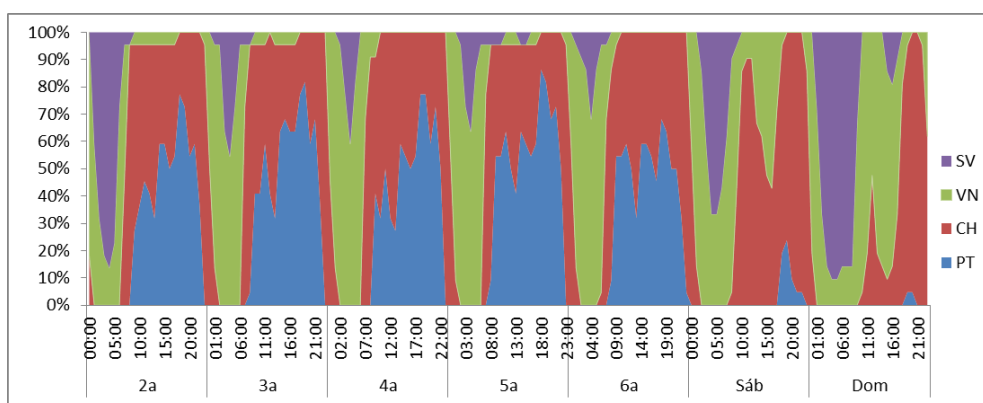


Figura 16 – Distribuição horária dos ponderadores dos custos incrementais de redes por período tarifário para um dado nível de tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)

²⁶ Na prática usaram-se diretamente os preços das tarifas de uso das redes publicadas pela ERSE. A diferença entre os custos incrementais e os preços é um fator de escalamento destinado a garantir que os proveitos regulados da empresa são obtidos.

A Figura 17 ilustra a composição dos custos marginais semi-horários de uso das redes para o fornecimento a um cliente residencial em Baixa Tensão, calculada com o método descrito (passo 6).

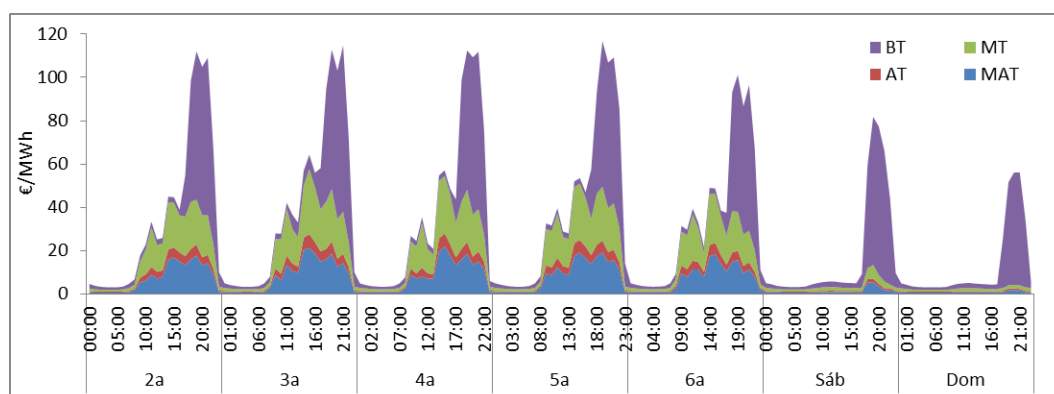


Figura 17 – Composição do custo incremental total semi-horário de uso das redes utilizadas por um consumidor em Baixa Tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)

Os custos incrementais de redes foram somados, em cada meia hora, aos custos marginais de produção e assim construídos os vetores do custo marginal de fornecimento de um consumidor residencial ou pequena empresa (Figura 18).

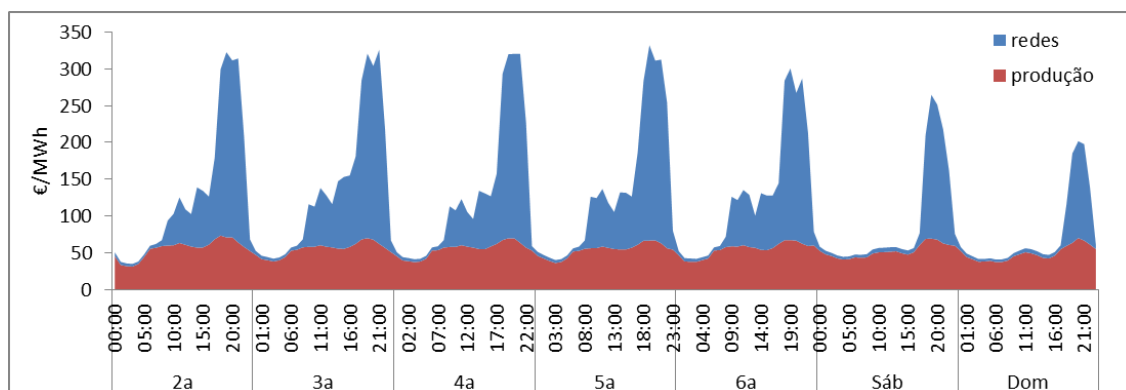


Figura 18 – Custos marginais de fornecimento horários, para um cliente em Baixa Tensão (exemplo de uma semana típica de inverno)

Foi ainda considerado um perfil alternativo para os custos marginais, de modo a avaliar a sensibilidade dos períodos tarifários ao custo marginal de fornecimento. Neste perfil alternativo, o método utilizado foi igual, alterando apenas a duração dos períodos tarifários referida no passo 2. Neste caso, a duração dos períodos tarifários prevista no Regulamento Tarifário da ERSE foi utilizada para todos os períodos (ponta, cheias, vazio normal e super vazio). A Tabela X apresenta as durações anuais dos períodos tarifários considerados nos perfis de custos marginais.

Tabela X – Duração dos períodos tarifários considerada na construção do perfil dos custos marginais

Duração dos períodos tarifários [h/ano]					
Custos marginais		Ponta	Cheias	Vazio normal	Super vazio
Cenário base	MAT, AT e MT	1 100	3 697	2 503	1 460
	BT	560	4 550	2 190	1 460
Cenário alternativo	MAT, AT e MT	991	3 807	2 503	1 460
	BT	1 460	3 650	2 190	1 460

A Figura 19 apresenta os dois perfis de custo marginal considerados.

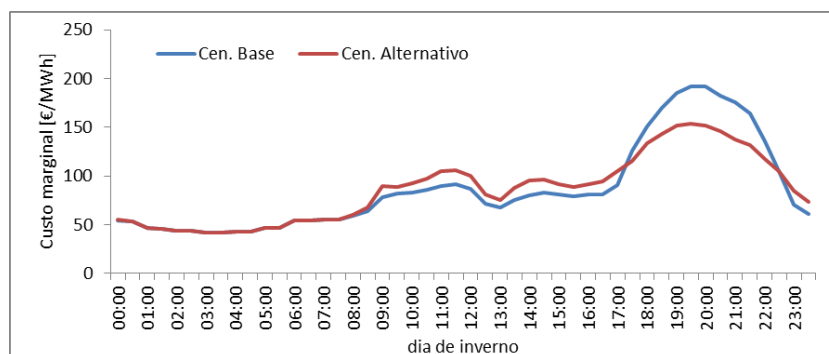


Figura 19 – Custos marginais em cada meia hora

ANEXO V – QUADROS DE RESULTADOS SUPLEMENTARES

Tendo apenas sido apresentados no corpo do trabalho os resultados essenciais para suportar as conclusões referidas, neste anexo são apresentados alguns resultados adicionais obtidos durante a fase experimental do projeto.

Na análise de sensibilidade aos valores da elasticidade procura-preço, apresentam-se os casos dos perfis de consumo A e B (Tabela XI e Tabela XII, respetivamente).

Tabela XI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil A)

Perfil	Elasticidade	Variação da fatura [€/ano]	ε_{ii}	ε_{ij}	Perm [h]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil A	Base	-16,54	-0,2	0,05	2	2,35	17:30 - 22:30
Perfil A	Elevada	-36,73	-0,4	0,10	4	2,35	17:30 - 22:30
Perfil A	Reduzida	-10,06	-0,1	0,00	n.a.	2,35	17:30 - 22:30
Perfil A	Otimizada	-18,92	-0,2	0,05	2	2,28	18:30 - 23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços; Perm - raio de permanência da elasticidade cruzada

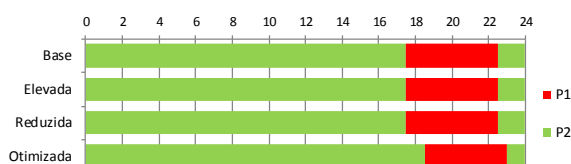
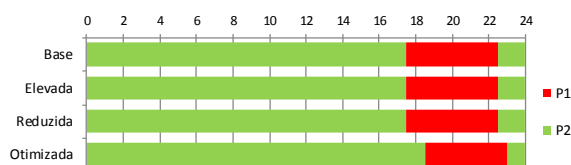


Tabela XII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à elasticidade procura preço (perfil B)

Perfil	Elasticidade	Variação da fatura [€/ano]	ε_{ii}	ε_{ij}	Perm [h]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil B	Base	-18,69	-0,2	0,05	2	2,47	17:30 - 22:30
Perfil B	Elevada	-41,32	-0,4	0,10	4	2,46	17:30 - 22:30
Perfil B	Reduzida	-11,43	-0,1	0,00	n.a.	2,47	17:30 - 22:30
Perfil B	Otimizada	-22,28	-0,2	0,05	2	2,39	18:30 - 23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços; Perm - raio de permanência da elasticidade cruzada



Quanto à influência do perfil temporal do custo sobre a localização dos períodos tarifários, apresentam-se os resultados obtidos para os casos A e B, verificando-se que as hipóteses de custo marginal influenciam os períodos tarifários fixados (Tabela XIII e Tabela XIV, respetivamente).

Tabela XIII - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil A)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil A	Base	-16,54	2,35	17:30 - 22:30
Perfil A	Alternativa	-6,50	1,72	11:00-12:30 17:00-23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços

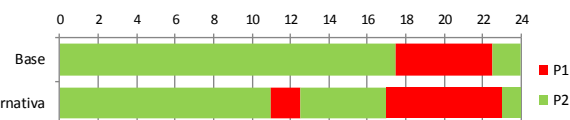
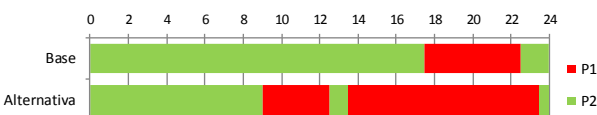


Tabela XIV - Resultados relativos à análise de sensibilidade ao custo marginal horário (perfil B)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil B	Base	-18,69	2,47	17:30 - 22:30
Perfil B	Alternativa	-8,11	2,06	9:00-12:30 13:30-23:30

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços



Foi também simulada a utilização de uma segunda função objetivo. Quando comparados com os resultados obtidos no caso base, os resultados obtidos com a função objetivo alternativa não revelaram qualquer modificação da localização dos períodos tarifários nos 3 casos, A, B e C (Tabela XV, Tabela XVI e Tabela XVII, respetivamente).

Tabela XV - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil A)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil A	Base	-16,54	2,35	17:30 - 22:30
Perfil A	Alternativa	-16,54	2,35	17:30 - 22:30

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços



Tabela XVI - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil B)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil B	Base	-18,69	2,47	17:30 - 22:30
Perfil B	Alternativa	-18,69	2,47	17:30 - 22:30

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços

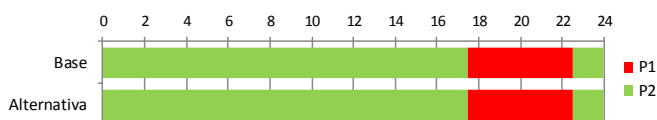
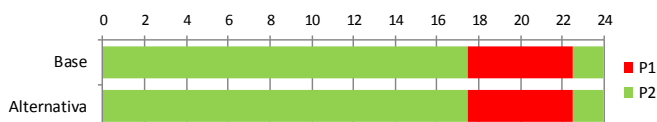


Tabela XVII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil C)

Perfil	Custo	Variação da fatura [€/ano]	P1/P2	Horário de ponta
Perfil C	Base	-20,01	2,45	17:30 - 22:30
Perfil C	Alternativa	-20,01	2,45	17:30 - 22:30

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços



Anexos

A sensibilidade dos períodos tarifários à utilização, na heurística, de uma função objetivo diferente do caso base foi analisada. Como a Tabela XVIII demonstra, os resultados obtidos com as duas alternativas da função objetivo foram iguais.

Tabela XVIII - Resultados relativos à análise de sensibilidade à função objetivo (perfil C com vários cenários de elasticidade)

Perfil	Elasticidade	ε_{ii}	ε_{ij}	Perm [h]	f - custo marginal			f' - contribuição para a ponta da rede		
					P1/P2	Variação da fatura [€/ano]	Horário de ponta	P1/P2	Variação da fatura [€/ano]	Horário de ponta
Perfil C	Base	-0,2	0,05	2	2,45	-20,01	17:30 - 22:30	-20,01	-20,01	17:30 - 22:30
Perfil C	Elevada	-0,4	0,10	4	2,44	-45,25	17:30 - 22:30	-45,24	-45,24	17:30 - 22:30
Perfil C	Reduzida	-0,1	0,00	n.a.	2,45	-12,07	17:30 - 22:30	-12,07	-12,07	17:30 - 22:30
Perfil C	Otimizada	-0,2	0,05	2	2,34	-24,08	17:30 - 23:00	-24,02	-24,02	17:30 - 23:00

Legenda: P1/P2 - rácio entre preços; Perm - raio de permanência da elasticidade cruzada